

令和元年6月18日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06069

研究課題名(和文)希薄乱流予混合火炎の大域的・局所的火炎構造に基づく火炎応答機構の解明と制御

研究課題名(英文)Elucidation of flame response mechanism based on global and local flame structure of lean turbulent premixed flame and combustion control

研究代表者

志村 祐康(Shimura, Masayasu)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：30581673

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、希薄乱流予混合火炎の火炎構造に基づき火炎応答特性を明らかにするとともに、誘電体バリア放電(DBD)プラズマアクチュエータ等の制御デバイスの反応性気体制御に対する火炎応答特性を明らかにし、有用な燃焼制御法を確立することを目的として研究を遂行した。高速度平面レーザー誘起蛍光法と粒子画像流速計などの複合計測を行い、火炎構造、火炎自発光及び圧力変動特性との関係を明らかにし、燃焼振動現象の理解の深化に貢献した。さらに、制御デバイスの圧力変動に対する能動制御法を構築し、特に、圧力変動に対して特定の位相差をもって制御を行うことで、旋回乱流予混合火炎の時間的・空間的変動を抑制することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、近年当該研究分野で注目されている高強度乱流条件における希薄予混合火炎の火炎構造および旋回乱流予混合火炎における大域的火炎構造を複合レーザー計測により明らかにすることで、燃焼振動発生の非線形な火炎応答特性の現象解明に貢献した。さらに、DBDプラズマアクチュエータを用いた能動的な燃焼制御手法を開発し、その振動燃焼制御に対する有効性を明らかにした。これらの知見は、他の燃焼現象や制御手法においても展開可能であり、また、流体工学における乱流制御においても重要な知見であり、発展性を有している。本研究で得られた成果は、高効率燃焼器の開発を通じて地球環境問題の解決に貢献できるものと期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, the flame response characteristic was clarified based on the flame structure of lean turbulent premixed flames, and the flame response characteristics for reactive gas control of control device such as DBD (Dielectric Barrier Discharge) plasma actuator was clarified to be useful, which will contribute to establishing of a stable combustion control method. Combined measurement of high speed plane laser induced fluorescence method (PLIF) and particle image velocimetry (PIV) revealed that the relationship between flame structure, chemiluminescence and pressure fluctuation, and contributed to deepening the understanding of the combustion oscillation phenomenon. Furthermore, an active control method for pressure fluctuation of the control device can suppress temporal and spatial fluctuations of a swirling turbulent premixed flame by controlling control device with a specific phase difference to pressure fluctuation.

研究分野：熱流体工学

キーワード：乱流燃焼 希薄予混合火炎 レーザ計測 火炎応答 燃焼制御 DBDプラズマアクチュエータ 平面レーザー誘起蛍光法 粒子画像流速計

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本の一次エネルギーの多くは化石燃料の燃焼により供給されている。再生可能エネルギーや原子力発電等が日本及び世界各国のエネルギー需要を満たすようになるには長い年月を要するため、二酸化炭素排出量削減目標を達成するには、次世代の高効率・低環境負荷燃焼器の開発が必要不可欠である。産業用ガスタービン燃焼器では、高効率化と環境汚染物質の排出量低減のために、希薄予混合燃焼を採用することが有効であるが、一般に実用燃焼器内の流れは高レイノルズ数の乱流状態にあり、希薄予混合燃焼では、振動燃焼等の不安定現象が生じる。振動燃焼は、燃焼器の機械的破壊を引き起こすため、希薄予混合燃焼を採用した高効率・低環境負荷燃焼器を実現するには振動燃焼の制御法を確立することが必要であるが、振動燃焼には未解明な点が多く残されている。

振動燃焼は燃焼器内の熱発生率変動と圧力変動のカップリングに起因すると考えられてきた。しかし、高強度乱流条件や希薄燃焼条件の下では、Peters により提案された乱流燃焼ダイアグラム(Peters, 1999)における thin reaction zones や broken reaction zones に分類される火炎が形成される可能性があり、複雑な乱流燃焼現象を呈することが予測される。高強度乱流を伴う希薄酸素・空気旋回乱流予混合火炎では圧力変動及び熱発生率のカップリングでは説明できない非線形な火炎応答特性及び振動燃焼特性を呈することが明らかにされつつある。このため、次世代燃焼器の研究開発には、thin reaction zones や broken reaction zones における局所的な乱流火炎構造と、それが保炎機構を有する燃焼器内で形成する大域的な火炎構造が、火炎応答及び振動燃焼現象に与える影響を解明し、これらの数学モデルを構築することが必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、高強度乱流を伴う希薄乱流予混合火炎の大域的・局所的火炎構造を平面レーザー誘起蛍光法(PLIF)と粒子画像流速計(PIV)などの複合レーザー計測を用いて明らかにすると共に、旋回乱流燃焼器内において火炎構造に基づいた火炎応答特性を明らかにし、誘電体バリア放電(DBD)プラズマアクチュエータなどの反応性気体制御を用いた有用な燃焼制御法を確立することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究は、再循環流を伴う旋回乱流予混合火炎の燃焼特性の解明及び振動燃焼制御手法の構築を目的としているが、基盤となる乱流予混合火炎の局所構造を明らかにするために、定容容器乱流燃焼器及び乱流噴流バーナーに対する複合レーザー計測から乱流火炎構造を明らかにし、その知見に基づいて、旋回乱流予混合火炎の大域的・局所的火炎構造と燃焼器内の圧力変動との関係を複合レーザー計測及び自発光計測等により検討した。さらに火炎と流動との関係に基づいて、制御デバイスとして DBD プラズマアクチュエータを用いた燃焼制御手法を開発した。

乱流火炎構造の解明においては、既燃領域に存在する OH ラジカル、火炎前縁で生成されるホルムアルデヒド(CH_2O)を対象とした PLIF とステレオ PIV を主に使い、これらの積から局所的な熱発生率の予測を行うことで局所的な火炎構造について検討した。また、位相平均、dynamic mode decomposition (DMD)、スペクトル解析などを行うことで大域的な火炎構造特性について検討した。図 1 は用いた旋回乱流燃焼器及び複合レーザー計測装置の一例を示している。

4. 研究成果

(1) 希薄乱流予混合火炎の局所火炎構造の解明

高強度乱流条件下における予混合火炎の局所火炎構造および熱発生率の特性を明らかにするために、乱流条件及び圧力を制御可能な定容容器燃焼器に形成されるメタン・空気自由伝播乱流予混合火炎を対象として OH ラジカルと CH_2O の同時 PLIF 計測を行った。図 2 は

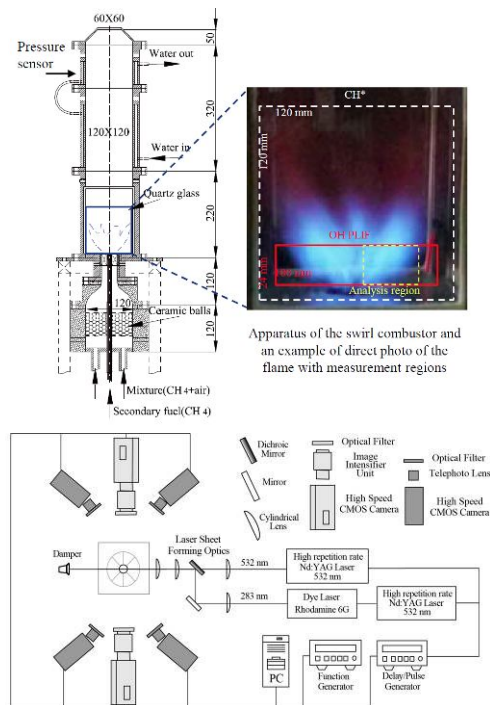


図 1 旋回乱流燃焼器(上)及び複合レーザー計測装置(下:時系列 OH PLIF, ステレオ PIV, 自発光同時計測)の一例

同時 PLIF 計測結果の一例を示している。乱流を発生させるファンの回転数と当量比 (ϕ) を条件に示しており、当量比が 1.0 の場合、Peters の乱流燃焼ダイアグラムで corrugated flamelets, 当量比が 0.7, 0.6 の条件で thin reaction zones に分類される。図中のそれぞれ赤い領域が計測対象の LIF 信号が高い値を示している。Corrugated flamelets に分類される火炎では、局所的な火炎構造は層流火炎と近い構造となるが、thin reaction zones に分類される火炎では、特にホルムアルデヒドの存在領域が拡大し、火炎の反応領域が広がることになる。このような結果から、局所的な火炎構造のレイノルズ数依存性及び当量比依存性を明らかにした。

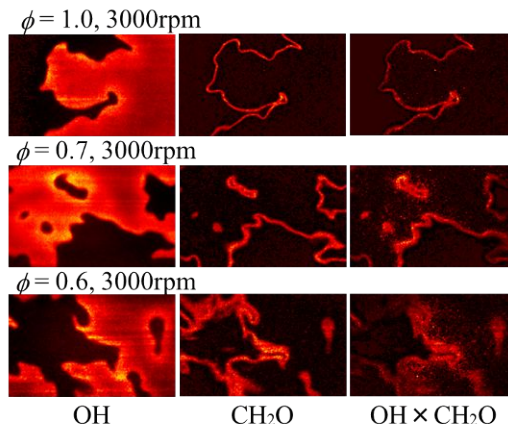


図2 OH-CH₂O 同時 PLIF 計測例

また、乱流噴流火炎及び自由伝播乱流火炎における PLIF 計測から、未燃予混合気塊と燃料消費速度の上昇特性または局所的な熱発生率特性との関係を明らかにし、未燃予混合気塊の乱流燃焼速度上昇に対して重要な役割を果たしていることを明らかにした。これらの知見は、再循環流を伴う旋回乱流予混合火炎の火炎応答及び燃焼制御を行う上での基礎的知見となった。

(2) 旋回乱流燃焼器における大域的な火炎構造及び圧力変動に対する火炎変動応答特性

光学計測が可能な旋回乱流燃焼装置を用いて、メタン・空気旋回乱流予混合火炎を対象として、高時間分解能 OH PLIF, 高空間分解能ステレオ PIV 及び時系列ステレオ PIV と圧力変動, 自発光の同時計測を行った。図 3 は時系列 OH PLIF の結果の一例を示している。予混合気が乱流により複雑に湾曲しながら、微細な未燃予混合気が分断されることがわかる。このような計測結果に対して、圧力位相平均解析, DMD やスペクトル解析等から、大域的な火炎構造と圧力変動との関係を明らかにした。図 4 は PLIF 結果の二値化画像により得られた平均反応進行変数の等値線分布と DMD モードを示している。特に微細な未燃予混合気塊が分断される領域では、平均反応進行変数が高い領域において DMD モードが高い値を示すことが明らかにされた。このような解析から、燃焼により再循環領域が受ける影響を明らかにし、火炎の大域的変動特性において未燃予混合気塊の分断の重要性を明らかにした。

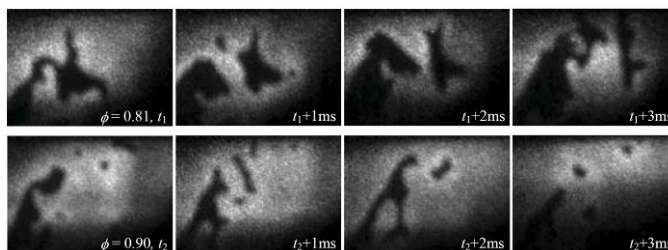


図 3 高速 OH PLIF 計測。上：当量比 0.81, 下：当量比 0.90。各画像の時間間隔は 1ms。

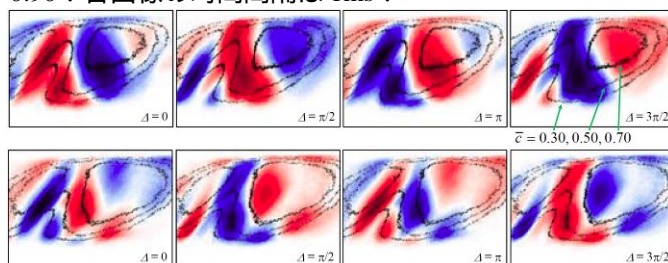
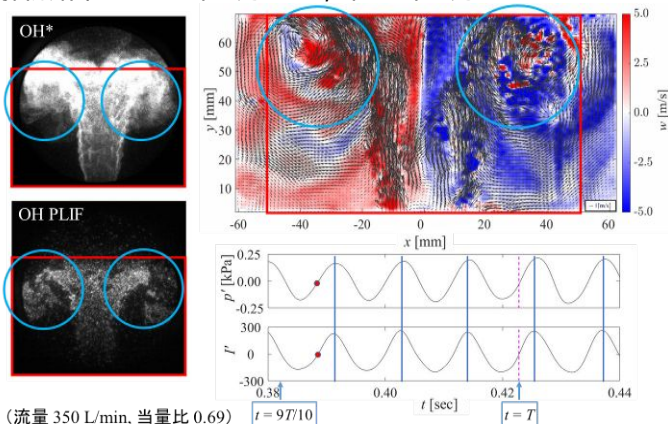


図 4 平均反応進行変数(c)の等値線分布(黒線)及び DMD 解析結果。上：当量比 0.81, 下：当量比 0.90。



(流量 350 L/min, 当量比 0.69) 図 5 振動燃焼遷移過程終盤における PIV, PLIF, 火炎自発光及び圧力変動の同時計測結果の一例。

さらに、火炎構造及び流動と圧力変動との非線形な関係を明らかにするために、高速度 OH PLIF とステレオ PIV を用いて燃焼振動の遷移過程における燃焼特性を検討し、圧力変動などの増大に対する燃焼器流入口付近のせん断層での渦放出の影響を明らかにした。図 5 は高速度ステレオ PIV, OH PLIF/自発光及び圧力変動の同時計測結果の一例を示している。振動燃焼への遷移過程は、圧力変動強度の増大

期間として定義した。振動燃焼遷移過程において、特に大規模な渦構造が火炎を巻き込む大域的な構造が、圧力変動の増大に伴い上流域で生じるとともに半径方向に拡大する。大規模渦構造により火炎の巻き込みが生じ、また、振動燃焼への遷移過程においては、空間的な熱発生率の指標となる OH 自発光と圧力の変動の位相差が変化していくことが明らかにされた。遷移過程初期における制御の適用が有効であることを示唆しており、将来の振動燃焼制御手法開発において重要な知見である。

(3) DBD プラズマアクチュエータによる能動的振動燃焼制御手法の開発

燃焼器流入口で形成される大規模渦の放出が振動燃焼の要因の一つであることに着目し、これを制御可能な制御デバイスとして旋回型乱流燃焼器の燃焼室流入口に設置する円形 DBD プラズマアクチュエータを開発した。制御デバイスが流動に与える影響を、非燃焼場での連続及び間欠的駆動状態における、高空間分解能ステレオ PIV 及び時系列 PIV 計測から確認するとともに、燃焼条件における連続及び間欠的な駆動が振動燃焼に与える影響を自発光及び圧力変動計測から明らかにした。さらに DBD プラズマアクチュエータの間欠駆動を用いた火炎の能動制御手法を構築した。図 6 は構築した能動制御手法の概略図を示している。支配的な圧力変動に対するアクチュエータの駆動位相を適切に選択することにより、燃焼器内の圧力および火炎自発光の変動が抑制されることを明らかにした。図 7 は非制御条件及び最も圧力が抑制された制御条件における圧力変動スペクトルを示している。非制御条件で観察された 68Hz 付近の圧力変動が大きく抑制されることがわかる。また、円形 DBD プラズマアクチュエータの一サイクルでの稼働時間割合を狭めることにより、さらにロバストな制御が可能であることを明らかにした。このような DBD プラズマアクチュエータの能動制御により、火炎の大規模な巻き込みが抑制され、圧力変動強度を大きく低減可能であることを明らかにした。これらは DBD プラズマアクチュエータの顕著な流体力学的制御効果を示している。

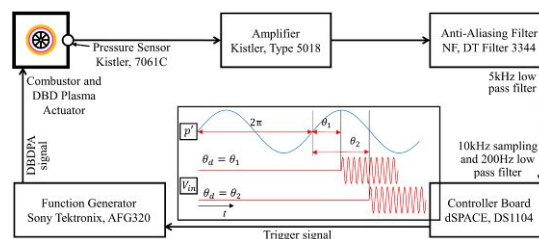


図 6 DBD プラズマアクチュエータを用いた乱流火炎の能動制御手法の概略図

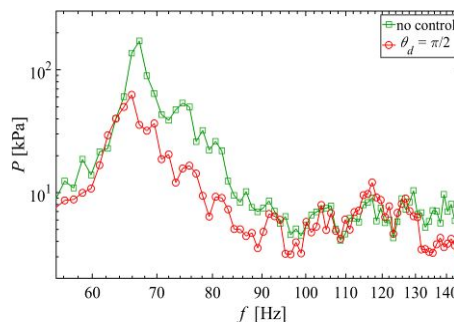


図 7 非制御時および DBD プラズマアクチュエータを用いた制御時の圧力変動スペクトル例

さらに今後、DBD プラズマアクチュエータの燃焼制御特性を気体の反応性の面から深化させること、また上記の振動燃焼遷移過程における非線形な火炎と圧力の応答特性を踏まえた制御モデルを構築することにより、本研究課題で構築された DBD プラズマアクチュエータを用いた能動制御手法は、より高効率でロバストな制御手法となることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- (1) Masayasu Shimura, Ayane Johchi, Mamoru Tanahashi, Consumption rate characteristics of a fine-scale unburnt mixture in a turbulent jet premixed flame by high repetition rate PLIF and SPIV, Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 11 (2016), No. 3, p. JTST0047, doi.org/10.1299/jtst.2016jtst0047. 査読有.
 - (2) 志村祐康, 青木虹造, 店橋護, “直接数値計算に基づく矩形旋回型乱流燃焼器内の熱音響モードに関する研究” 燃焼学会誌, 特集記事(燃焼振動の基礎的研究), 59-187 (2017), pp. 16-23. 査読無.
- (他 2 件)

〔学会発表〕(計 22 件)

- (1) Shingo Yoshida, Yoshitsugu Naka, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi, Propagation Characteristics of Turbulent Methane-Air Premixed Flames at Elevated Pressure in a Constant Volume Vessel, 18th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, (2016).
- (2) Koji Yabuta, Kozo Aoki, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi, An Experimental Study on Dynamics of Turbulent Premixed Flame Stabilized in a Swirl Flow by High-speed OH PLIF Measurements, Proceedings of the 4th International Forum on Heat Transfer (IFHT2016), (2016).

- (3) Tsugumi Maeda, Shingo Yoshida, Yoshitsugu Naka, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi, OH-CH₂O PLIF Measurements of Heat Release Rate in Turbulent Premixed Combustion, The Fifth International Education Forum on Environmental and Energy Science, (2016).
 - (4) Tsugumi Maeda, Shingo Yoshida, Yoshitsugu Naka, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi, OH-CH₂O PLIF for Investigation of Heat Release Rate Characteristics in Turbulent Premixed Flames, First Asian Conference on Thermal Sciences, (2017).
 - (5) Tsugumi Maeda, Masayasu Shimura, Yuki Minamoto, Mamoru Tanahashi, OH-CH₂O PLIF Measurements in Lean Turbulent Premixed Flames, the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, (2017)
 - (6) Sujoy Chakraborty, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi, PIV Investigation of Effects of Circular DBD Plasma Actuator on Turbulent Swirling Premixed Flame, 11th Asia-Pacific Conference on Combustion, (2017)
 - (7) Aoki, K., Shimura, M., Minamoto, Y., Tanahashi, M., “Response of Heat Release Rate to Flame Straining in Swirling Hydrogen-air Premixed Flames”, The 12th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, (2018).
 - (8) Shimura, M., Maeda, T., Minamoto, Y., Tanahashi, M., “Investigation of reaction zone structure of lean methane-air turbulent premixed flames with OH-CH₂O PLIF”, 9th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, (2018).
 - (9) 前田つぐみ, 吉田真悟, 中吉嗣, 源勇気, 志村祐康, 店橋護, 密閉容器内乱流燃焼の OH-CH₂O PLIF 同時計測, 第 53 回伝熱シンポジウム講演論文集, 2016 年.
 - (10) 志村祐康, 店橋護, 高時間分解能 PLIF-ステレオ PIV 同時計測による乱流燃焼速度特性の解明, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 先端技術フォーラム「複雑流動現象の解析技術と学理構築」招待講演, 2016 年.
 - (11) 小松謙治朗, 志村祐康, 店橋護, 円形 DBD プラズマアクチュエータが巡回乱流場に与える影響, 日本流体力学会年会 2016 講演論文集, 2016 年.
 - (12) 藪田晃司, 青木虹造, 源勇気, 志村祐康, 店橋護, 高時間分解能 OH-PLIF 計測による巡回乱流予混合火炎の動的特性の解明, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2016 講演論文集, 2016 年.
 - (13) 前田つぐみ, 吉田真悟, 中吉嗣, 源勇気, 志村祐康, 店橋護, OH-CH₂O PLIF による乱流予混合火炎の熱発生率計測, 第 54 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2016 年
 - (14) 小松謙治朗, 志村祐康, 源勇気, 店橋護, 円形 DBD プラズマアクチュエータが巡回乱流希薄予混合燃焼に与える影響, 第 54 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2016 年
 - (15) 佐々木謙斗, 志村祐康, 店橋護, DBD プラズマアクチュエータによる巡回乱流予混合火炎の能動制御, 第 56 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2019 年
 - (16) 安宅優季, 志村祐康, 店橋護, 振動燃焼遷移過程における巡回乱流希薄予混合火炎の複合光学計測, 第 56 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2019 年
- (他 6 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：ガスタービンの燃焼器及びその燃焼制御手法

発明者：志村 祐康, 佐々木 謙斗, シュジョイ チャクラボルティ, 小松 謙治朗

権利者：東京工業大学

種類：特許願

番号：特願 2019-89526

出願年：2019

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究分担者

該当なし

(2)研究協力者

該当なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。