

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760160

研究課題名(和文)半導体レーザー吸収分光センサーを用いた振動燃焼の予測と乱流燃焼制御

研究課題名(英文)Development of turbulent combustion control method using diode laser absorption spectroscopy sensor

研究代表者

志村 祐康(Shimura, Masayasu)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：30581673

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：近年問題となっている地球・都市環境問題の解決には、各種燃焼器の高効率化と低環境負荷化が必要不可欠である。本研究では、ガスタービンエンジン燃焼器等において問題となる振動燃焼を抑制するために、旋回型乱流予混合火炎の直接数値計算結果に対してDynamic Mode Decompositionを施すことで振動燃焼特性を明らかにすると共に、半導体レーザー吸収分光センサー適用シミュレーションを行った。さらに、半導体レーザー吸収分光信号による能動制御アルゴリズムに基づくDSP(digital signal processor)を用いた燃焼制御システムの構築を進めた。

研究成果の概要(英文)：To resolve the global and regional environmental issues, developments of high efficiency and low emission combustors are indispensable. As for the gas turbine combustors, occurrence of combustion oscillations, which is still required to be understood in more detail, often prevents the development of the combustors, and hence establishments of methods for suppression of combustion oscillation are desired. In this research, characteristics of the combustion oscillation were clarified by applying dynamic mode decomposition to the results of direct numerical simulation of turbulent swirling premixed flame, and simulation of applying diode laser absorption spectroscopy was applied to the DNS results. Moreover, development of a combustion control system based on active control algorithm with the signal from diode laser absorption spectroscopy has been proceeded.

研究分野：熱流体工学

キーワード：乱流燃焼 予混合火炎 振動燃焼 能動制御 レーザ計測

1. 研究開始当初の背景

近年の地球・都市環境問題への意識の高まりと共に、再生可能エネルギーの有効利用が求められているが、現在でも日本の一次エネルギーの約 85% 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、環境問題の早急な解決には、高効率・低環境負荷燃焼器の開発が必要不可欠である。地球温暖化を抑制するためには、主要因である二酸化炭素 (CO₂) の排出量を削減する必要があるが、このためには燃焼器の効率を向上させることが不可欠となる。産業用ガスタービン燃焼器では、燃焼器出口温度を上昇させて高効率化を図り、さらにコンバインド・サイクルを導入することで、現今では発電効率が 60% を超えるガスタービンが開発されつつある。一方、酸性雨や都市環境等を保全するためには、窒素酸化物 (NO_x) 等の環境汚染物質の排出量を低減する必要がある。Thermal NO の生成速度は高温状態において急激に上昇するため、NO_x 排出量の低減には既燃ガスの高温での滞留時間を短縮する必要があるが、既燃ガス温度を均一化することが可能な希薄予混合燃焼を採用することが有効である。しかし、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、燃焼騒音を増大させ、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不可欠である。

従来、燃焼振動や燃焼騒音の原因は、燃焼器内の熱発生率の周期的な変動であると考えられている。しかし、それらを直接計測することが困難であることから、燃焼器内の圧力変動に対して制御が行われている。これは、圧力変動の支配的なモードに対して逆位相の音波等を与える線形的な制御である。しかし、燃焼器内の圧力変動のピーク周波数は一般的に高く、それらを直接制御可能な高い時間応答性を有した制御デバイスは存在しない。これに対して、以前の研究 (Gyung-Min Choi et al., Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 1807-1814 (2005)) から、熱発生率の変動は乱流予混合火炎のマイクロスケール構造と密接に関連していることが明らかにされている。この特性に注目して、圧力変動の高いピーク周波数ではなく、それらを誘起する比較的低周波数の乱流火炎の変動に対して制御を与えることにより、燃焼器内の圧力変動を制御できることが近年の研究から明らかにされている。これは、乱流火炎の構造と圧力変動の非線形な関係を利用した非線形制御であり、実用燃焼器の能動制御に拡張できれば、比較的低コストで高効率な燃焼器制御が実現できるものと予測される。

2. 研究の目的

本研究では振動燃焼を抑制するために、振動燃焼の起源である熱発生率の変動、すなわち火炎構造の時間的・空間的変動と燃焼器内の圧力変動の非線形な関係に着目して、乱流燃焼の能動制御に必要な不可欠な制御用センサー、制御デバイス及び制御アルゴリズムを総合的に開発し、ガスタービンモデル旋回型乱流燃焼器において能動制御実験を行い、振動燃焼の予測法と乱流燃焼の能動制御法を確立することを目的としている。

3. 研究の方法

これまでに開発した半導体レーザー吸収分光センサーに波長変調検出法を導入し、センサーの高精度化を行う。高精度化した半導体レーザー吸収分光法を圧力変動計測及び複数化学種濃度の複合レーザー計測と共に非制御条件の高レイノルズ数乱流予混合火炎に適用するとともに、乱流予混合火炎を対象とした直接数値計算 (DNS) 結果に対してセンサー適用シミュレーションを行うことにより、センサー信号と圧力変動及び火炎構造の関係を解明する。

ガスタービン燃焼器を模擬した旋回型乱流燃焼器において、種々の条件下での圧力変動特性、火炎構造等とセンサー信号の関係を明らかにする。これらの結果から乱流燃焼の能動制御に重要な要素を抽出し、制御アルゴリズムの構築を行うとともに、これと制御デバイスとしての二次燃料噴射及び制御用センサーとして半導体レーザー吸収分光センサー等からなる制御システムを構築し、ガスタービンモデルの旋回型乱流燃焼器において能動制御実験を行い、乱流燃焼場の能動制御技術の確立を目指す。

4. 研究成果

(1) 旋回乱流予混合火炎の火炎構造の解明

旋回乱流予混合火炎に吸収分光センサーを適用した際に得られる信号特性を理解するには、詳細な火炎構造を明らかにする必要がある。本研究では、スワール数が 0.6 (図 1) 及び 1.2 (図 2) の条件における旋回乱流予混合火炎の DNS 結果から、スワール数が燃焼器内の温度分布や各化学種の分布と与

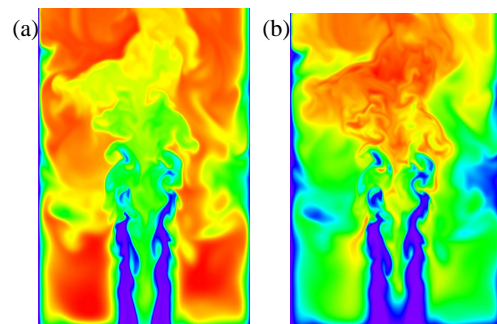


図 1: スワール数 0.6 における旋回乱流予混合火炎の火炎構造例 (燃焼器中心軸を含む断面)。左: 温度分布, 右: OH 質量分率分布。

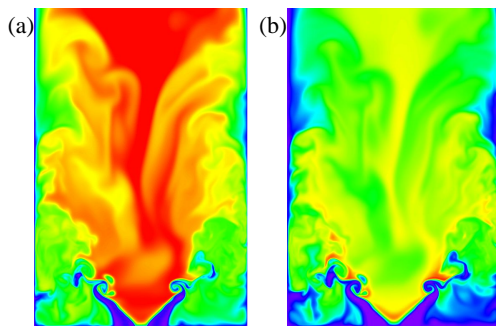


図 2：スワール数 1.2 における巡回乱流予混合火炎の火炎構造例（燃烧器中心軸を含む断面）。左：温度分布，右：OH 質量分率分布。

える影響を明らかにした。さらに局所的な火炎構造を明らかにし、スワール数が低い条件では外側再循環領域において、スワール数が高い条件下では内側再循環領域において OH ラジカル濃度及び既燃ガス温度が高まることから、これらの領域が巡回乱流火炎の保炎機構として重要な役割を果たしていることを明らかにした。

(2) 巡回乱流予混合火炎の振動モードの解明

燃烧器内の振動モードに対する理解を深めることは、センサー信号の出力から制御アルゴリズムを構築する上で重要である。本研究では、矩形燃烧器における大気圧条件下で巡回乱流予混合火炎の DNS 結果にスペクトル解析及び dynamic mode decomposition (DMD) を適用することで燃烧器内圧力変動と熱発生率の動的特性のスワール数依存性を明らかにした（図 3）。さらに、音響エネルギー方程式における生成項に対して DMD を施し、熱音響不安定性のレイリー判定において重要となる音響エネルギー供給と渦運動との関係を明らかにした。このことから、燃烧器内の流体運動を制御することで熱音響不安定性を抑制できる可能性を明らかにした。

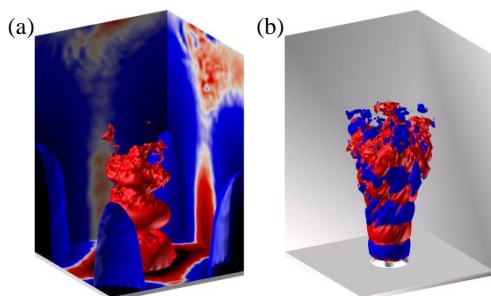


図 3：矩形燃烧器内の巡回乱流予混合火炎の圧力場 (a) 及び熱発生率場 (b) の振動モードの例

(3) 半導体レーザー直接吸収分光法の高精度化と乱流燃烧制御システム開発の進展

半導体レーザー吸収分光センサーに波長変調検出法の一つである 2f 法を導入すること

で乱流燃烧制御用半導体レーザー吸収分光センサーの高精度化を行った。これを巡回型乱流燃烧器に適用し、2f 法を導入した半導体レーザー吸収分光法が振動燃烧の検出に有効であることを明らかにした。制御用センサーとして高周波数の振動燃烧にまで対応可能となるように高時間分解能化を検討し、1 kHz までの振動特性を明らかにすることが可能となった。半導体レーザー吸収分光法は、その計測原理において吸収媒体の一様性が仮定されるため、温度や化学種濃度等に空間変動が存在する計測対象の場合、その有効性を明らかにする必要がある。これには主に数値シミュレーションを用いて取り組んだ。上記の巡回乱流予混合火炎の DNS 結果の各化学種濃度、圧力及び温度の空間分布から、半導体レーザー吸収分光センサーを適用した場合の 2f 信号を HITRAN データベースに基づいて算出する半導体レーザー吸収分光センサー適用シミュレーションを構築した。

実用的な燃烧器では高圧力条件下で乱流火炎が形成されるため、乱流燃烧の能動制御法の確立には半導体レーザー吸収分光センサーの高圧力条件下での信号特性を明らかにするとともに、高圧乱流予混合火炎の火炎構造を明らかにする必要がある。乱流燃烧の振動燃烧に関する知見を高圧力条件への拡張するために、2 気圧における乱流予混合火炎の DNS 結果に対して半導体レーザー吸収分光センサー適用シミュレーションを行った。センサー信号、圧力変動及び火炎構造の時系列データにスペクトル解析等を適用することで、高圧力条件下における半導体レーザー吸収分光センサーの信号特性及び燃烧器内圧力変動との関係を検討した。

ガスタービンモデル燃烧器の巡回型乱流燃烧器において乱流燃烧の能動制御実験を行うために、制御デバイスとして二次燃料噴射、制御用センサーとして半導体レーザー吸収分光センサー、半導体レーザー吸収分光信号による能動制御アルゴリズムの構築を進め、digital signal processor (DSP) を用いた燃烧制御システムの開発を進展させた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

Kozo Aoki, Masayasu Shimura, Shinichi Ogawa, Naoya Fukushima, Yoshitsugu Naka, Yuzuru Nada, Mamoru Tanahashi, Toshio Miyauchi, Short- and Long-term Dynamic Modes of Turbulent Swirling Premixed Flame in a Cuboid Combustor, *Proceedings of the Combustion Institute*, 査読有, Vol. 35, No. 3, 2015, 3209-3217.

DOI:10.1016/j.proci.2014.10.003

Ayane Johchi, Yoshitsugu Naka, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi, Toshio Miyauchi, Investigation on Rapid Consumption of Fine Scale Unburned

Mixture Islands in Turbulent Flame via 10 kHz Simultaneous CH-OH PLIF and SPIV, *Proceedings of the Combustion Institute*, 査読有, Vol. 35, No. 3, 2015, 3663-3671.

DOI:10.1016/j.proci.2014.09.007

店橋護, 志村祐康, 福島直哉, スーパーコンピュータを用いた大規模乱流燃焼解析, 伝熱, 査読無, 32 巻, 2013, 33-38.

店橋護, 志村祐康, 福島直哉, 燃焼器における可視化技術の活用, 日本ガスタービン学会誌, 査読無, Vol. 41, No. 5, 2013, 11-16.

Masayasu Shimura, Komei Yamawaki, Naoya Fukushima, Young-Sam Shim, Yuzuru Nada, Mamoru Tanahashi, Toshio Miyauchi, Flame and Eddy Structures in Hydrogen-Air Turbulent Jet Premixed Flame, *Journal of Turbulence*, 査読有, Vol. 13, 2012, N42.

DOI:10.1080/14685248.2012.720022

店橋護, 福島直哉, 志村祐康, 由川格, 乱流火災構造研究の最先端 (DNS と先端レーザ計測), ながれ, 査読無, Vol. 31, No. 4, 2012, 333-338.

[学会発表] (計 3 3 件)

Masayasu Shimura, Shinichi Ogawa, Kozo Aoki, Naoya Fukushima, Mamoru Tanahashi, Toshio Miyauchi, Effects of Strain Rate on Heat Release Rate of Hydrogen-Air Premixed Turbulent Swirling Flame, 10th International ERACOFAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements (ETMM10), September 17-19, 2014, Marbella, Spain.

Kozo Aoki, Masayasu Shimura, Naoya Fukushima, Yoshitsugu Naka, Mamoru Tanahashi, Toshio Miyauchi, Three-Dimensional Dynamic Coherent Structures of Turbulent Swirling Premixed flame, The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16), June 24-27, 2014, Okinawa Convention Center (Ginowan-City, Okinawa, Japan).

青木虹造, 志村祐康, 福島直哉, 中吉嗣, 店橋護, 宮内敏雄, DMD 解析によるマイクロ燃焼器内の流動・燃焼特性の解明, 日本機械学会 関東支部第 20 期総会・講演会, 2014 年 3 月 14 日 ~ 3 月 15 日, 東京農工大学 (東京都・小金井市).

Shinichi Ogawa, Kozo Aoki, Naoya Fukushima, Masayasu Shimura, Mamoru Tanahashi, Toshio Miyauchi, DNS Investigation of Swirl Number Effects on Local Flame Structure of Turbulent Premixed Flame, The Second International Education Forum on Environment and Energy Science, December 13-17, 2013, California, USA.

Bossard Pierre-Edouard, 志村祐康, 店橋護,

宮内敏雄, Zimmer Laurent, 高速 PLIF・ステレオ PIV 同時計測による火災ダイナミクスに関する研究, 熱工学コンファレンス 2012, 2012 年 17 日 ~ 18 日, 熊本大学 (熊本県・熊本市).

Kotaro Kuchiki, Masayasu Shimura, Itaru Yoshikawa, Naoya Fukushima, Mamoru Tanahashi, Toshio Miyauchi, Local Structure of Swirling Premixed Flame in a Micro Scale Combustor, The 7th Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, September 24-27, 2012, Sicily, Italy.

Kotaro Kuchiki, Masayasu Shimura, Naoya Fukushima, Mamoru Tanahashi, Toshio Miyauchi, DNS of Turbulent Swirling Premixed Flame and Pressure Oscillations in a Micro Combustor, 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, August 19-24, 2012, Beijing, China.

Masayasu Shimura, Yuki Katada, Young-Sam Shim, Naoya Fukushima, Mamoru Tanahashi, Toshio Miyauchi, Effects of Shear on Flame and Eddy Structures in Hydrogen-Air Turbulent Plane Jet Premixed Flames, 9th International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements, June 6-8, 2012, Thessaloniki, Greece.

[その他]

アウトリーチ活動等

東京工業大学工大祭オープンキャンパスにおける研究室一般公開 (開催日: 平成 24 年 10 月 6, 7 日, 開催地: 東京工業大学大岡山キャンパス, 見学者数: 348 名) 女子高校生のための研究室ツアー (開催日: 平成 24 年 10 月 6, 7 日, 開催地: 東京工業大学大岡山キャンパス, 見学者数: 69 名)

東京工業大学工大祭オープンキャンパスにおける研究室一般公開 (開催日: 平成 25 年 10 月 12, 13 日, 開催地: 東京工業大学大岡山キャンパス, 見学者数: 212 名)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

志村 祐康 (SHIMURA, Masayasu)
東京工業大学・理工学研究科・准教授
研究者番号: 30581673