

平成 30 年 8 月 31 日現在

機関番号：54502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17988

研究課題名(和文) 化学発光分光法による乱流予混合火炎の燃焼診断手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of combustion-diagnosis technique for turbulent premixed flame by chemiluminescence spectroscopy

研究代表者

橋本 英樹 (Hashimoto, Hideki)

神戸市立工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：80383488

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)： 燃焼装置の効率向上および環境負荷の低減のためには、乱れを積極的に導入した乱流予混合燃焼の採用が有効である。しかし、過度の乱れの導入は火炎伸長による局所的な消炎を引き起こすと考えられている。このことは乱れによる燃焼促進効果に限界があることを示しており、その限界を明確にすることは高効率・高負荷燃焼器を設計する上で極めて重要な問題である。そこで本研究では、OH、CH、C2などの中間生成物からの化学発光を計測し、乱流予混合火炎の燃焼状態を診断する手法の確立を行った。

研究成果の概要(英文)： In order to improve the efficiency of combustion equipment and reduce the environmental load, it is effective to adopt turbulent premixed combustion that positively introduces turbulence. However, the introduction of excessive turbulence is thought to cause local quenching by flame stretch. This indicates that there is a limit to the combustion promotion effect due to turbulence, and clarifying the limit is a very important problem in designing a high efficiency and a high load combustor. Therefore, in this study, I established of combustion-diagnosis technique for turbulent premixed flame by chemiluminescence spectroscopy.

研究分野：燃焼工学

キーワード：燃焼 乱流予混合火炎 化学発光

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止や化石燃料の枯渇等のエネルギー・環境問題に対し、各種燃焼装置のより一層の効率向上は重要な課題である。燃焼装置の効率向上および環境負荷の低減のためには、乱れを積極的に導入した乱流予混合燃焼の採用が有効である。乱流予混合燃焼では乱れが強くなると乱流燃焼速度が増加する。しかし、乱流燃焼速度は乱れの増大に対して無限に増加するのではなく、ある条件で、乱れの速度変動により火炎が引きちぎられる現象、すなわち火炎伸長による局所的な消炎が起きると考えられている<sup>(1)</sup>。局所的な消炎は火炎全体の消炎に移行し、ついには燃焼が維持できなくなる。このことは乱れによる燃焼促進効果に限界があることを示しており、その限界を明確にすることは、高効率・高負荷燃焼器を設計する上で極めて重要な問題である。

乱流予混合火炎における局所的な消炎に関しては、対向流バーナ火炎などを使用した基礎的な研究が行われている<sup>(2)</sup>。これらの研究では、レーザ流速計を使用して火炎伸長率の詳細な計測が行われているものの、火炎の計測は目視観察による例が殆どで、消炎限界付近の火炎構造を定量的に明らかにするには至っていない。また、乱流予混合火炎における局所的な消炎は理論的に予測されているものの<sup>(1)</sup>、それを計測するための決定的な手法が確立されていないために実験的には確かめられていない。

消炎限界付近の火炎では火炎伸長により火炎温度が低下し、燃焼速度が減少するはずである。燃焼速度を直接計測することは極めて困難であるが、火炎前後の局所的なガス流速と火炎の移動速度を計測することにより燃焼速度を求めることができる。このような考えから、研究代表者は四つの受感部を有する静電探針を使用し、乱流予混合火炎の火炎片の三次元挙動に関する研究を行ってきた。しかし、現段階では乱流予混合火炎における局所的な火炎片の燃焼速度を精度良く計測することは困難と言わざるを得ず、高効率・低環境負荷の燃焼器を設計する上での明確な指針は得られていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、乱流予混合火炎における OH, CH, C<sub>2</sub> などの中間生成物からの化学発光を計測し、局所的な火炎温度や燃料と酸化剤の混合比等を計測する手法の確立を目的とする。具体的には、従来より化学発光の集光に使用されているカセグレン光学系を改良し、一つのカセグレン光学系で複数の位置からの化学発光を計測する手法を確立する。従来の化学発光計測では、カセグレン光学系により直径 100 $\mu$ m 程度のコアを一つのみ有する光ファイバに集光される発光のみが計測されていた。そこで本研究では、複数のコアを有するバンドルファイバを使用することに

より、一つのカセグレン光学系で複数の位置からの化学発光を計測可能なシステムの開発を行う。このカセグレン光学系と複数のコアを有するバンドルファイバを用いて、複数の位置より得られる化学発光を解析し、計測点を通る火炎の局所的な形状や動きを推定する手法を確立し、乱流予混合火炎における局所的な火炎温度や燃料と酸化剤の混合比等を計測する手法の確立を目的とする。

OH, CH, C<sub>2</sub> などの中間生成物からの化学発光を計測し、乱流予混合火炎の火炎構造を定量的に明らかにするための新たな計測手法を確立しようとする点が本研究の学術的な特色である。特に、消炎限界付近の火炎構造の定量的な評価方法の一つとして、C<sub>2</sub> の 473.7nm バンドと 516.5nm バンドの発光強度比から火炎温度を推定する手法を確立しようとする点が本研究の独創的な点である。本研究により乱流予混合火炎における局所的な消炎現象を計測する手法が確立されると、乱れによる燃焼促進効果の限界を明確にすることができる。このことは、「果たして、乱れによる燃焼促進効果には限界があるのか？」と言う燃焼学の長年の課題を解決することができるのみならず、高効率・高負荷燃焼器を設計する際の指針を得ることができ、学術的・工業的にも極めて意義が大きい。

また、燃焼器開発の現場での利用や次世代燃焼システムに望まれる燃焼の能動制御を念頭に置いた場合、燃焼診断技術は小型・簡易化が可能な高性能センサへの発展という工業的側面が重要となる。本計測手法は火炎帯における 4 つ波長帯の化学発光を同時に、高空間分解能で時系列計測することが可能であり、コストに関してもレーザ分光装置に比べ一桁も安価である。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず平成 27 年度において円管および矩形ノズルバーナ上に形成される層流予混合火炎を対象に、従来の化学発光計測システム(一つの計測点)から得られる化学発光信号と計測点を通る火炎の角度や速度、また火炎の曲率といった乱流予混合火炎で考慮すべき因子との関係を詳細に調べる。さらに、一つのカセグレン光学系で複数の位置からの化学発光を計測するために、カセグレン光学系の改良を行う。次に平成 28・29 年度において、一つで複数の位置からの化学発光が計測可能なカセグレン光学系を使用し、複数の位置より得られる化学発光を解析して、乱流予混合火炎の燃焼状態を診断する手法を確立する。以下に年度毎の研究手法の詳細を記す。

#### (1) 平成 27 年度

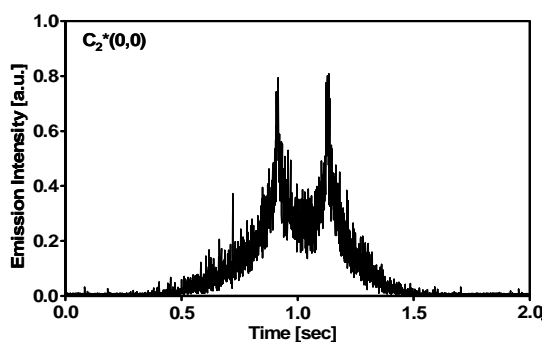
平成 27 年度は『化学発光信号と計測点を通る火炎の角度や速度、また火炎の曲率といった乱流予混合火炎で考慮すべき因子との関係の調査』および『一つで複数の位置

からの化学発光が計測可能なカセグレン光学系の開発』の二つの研究課題に取り組む。各課題の詳細は以下の通りである。

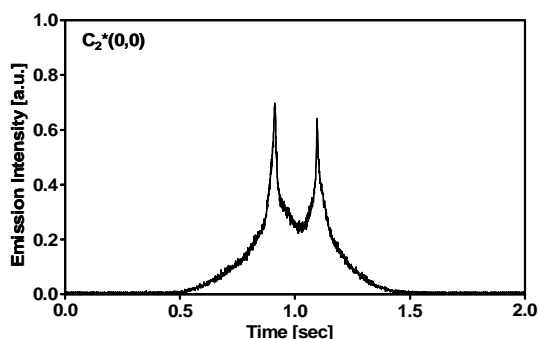
化学発光信号と計測点を通過する火炎の角度や速度、また火炎の曲率といった乱流予混合火炎で考慮すべき因子との関係の調査

種々の燃料濃度のプロパン・空気およびメタン・空気層流予混合火炎を対象に従来の化学発光計測システムを用いて OH, CH, C<sub>2</sub> からの化学発光を計測する。ここでは、まず矩形ノズルバーナ上に形成される二次元性の良い平面火炎がカセグレン光学系の計測点を通過する（実際には定在する火炎に対してカセグレン光学系を移動させる）際の角度を変化させ、その際に得られる化学発光信号の時間履歴を詳細に調べる。次に円管ノズルバーナ上に形成される火炎を対象に火炎の曲率を変化させた際に得られる信号の時間履歴を詳細に調べる。以上の実験の結果より、化学発光信号と計測点を通過する火炎の角度や速度、また火炎の曲率といった乱流予混合火炎で考慮すべき因子との関係を詳細に調べ、層流予混合火炎で得られた結果を乱流予混合火炎の計測に適用するための基礎的な知見の蓄積を行う。

なお、予混合火炎からの化学発光は微弱なために、一般に光電子増倍管からの出力を 10<sup>6</sup> から 10<sup>7</sup> 倍程度の高倍率に増幅する必要がある。そのため火炎の化学発光計測では信号の S/N 比や周波数特性が悪いといった致



(a) 従来の計測システム



(b) 改良後の計測システム

図2 ノイズ対策の効果

命的な問題点があった。そこで、本研究では研究代表者がこれまでに行ってきた静電探針法におけるノイズ対策技術を化学発光計測に応用し、徹底したノイズ対策を行う。これにより、図2に示すように従来の計測システムと比較して二桁以上も S/N 比を向上させることが可能となる。

一つで複数の位置からの化学発光が計測可能なカセグレン光学系の開発

一つのカセグレン光学系で複数の位置からの化学発光を計測するために、図3に示すような複数のコアを有するバンドルファイバを用いたカセグレン光学系の開発を行う。バンドルファイバの端面（同一平面上）に3つのコアを有する光ファイバを用いることで、同一平面上の3点からの化学発光を計測することが可能であり、このようなバンドルファイバは既に市販されている。しかし、乱流火炎の計測では、火炎の三次元挙動を考慮する必要があり、先述の同一平面上の3点以外に少なくとも1点、その平面上にない位置からの化学発光を計測する必要がある。そこで、上記の3つのコアを有するバンドルファイバおよびカセグレン光学系を改良し、一つのカセグレン光学系で同一平面内の3点とその平面以外の1点を加えた4つの位置からの化学発光を計測可能なシステムの開発を行う。なお、一つのカセグレン光学系で4つの位置からの化学発光を計測可能なシステムの開発が困難な場合は、3つのコアを有する光ファイバによる同一平面上の3点の計測に加え、別のカセグレン光学によりさらに1点の計測を行う方法で、火炎の三次元挙動を計測することとする。

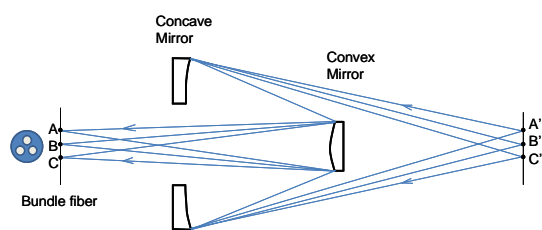


図3 多点計測用カセグレン光学系

#### (2) 平成 28・29 年度

平成 28・29 年度は『乱流予混合火炎の燃焼状態を診断する手法の確立』の研究課題に取り組む。

多点計測システムを用いて、まず層流予混合火炎の実験を行い、その性能の評価を行う。具体的には、計測点を通過する火炎の角度や速度、また火炎の曲率を変化させ、多点から得られた化学発光信号より、それらが正確に解析可能であるかを確認する。次に、本件研究で提案する手法を実際に乱流予混合火炎に使用し、局所的な火炎温度や燃料と酸化剤の混合比等を計測する手法の確立する。

#### 4. 研究成果

乱流予混合火炎では、混合気中の乱れによ

るひずみにより局所的な火炎温度が変化する．さらに、曲率を有する火炎が様々な速度で計測点を移動する．そこで、平成 27 年度は層流予混合火炎を対象に、これらの影響に対する化学発光の特性を詳しく調査した．その結果、図 4 に示すように、各化学種の発光強度の比、具体的には、OH/CH、 $C_2(1,0)/C_2(0,0)$ と当量比や火炎温度、さらにこれらとひずみ率の関係が明らかとなった．また、化学発光強度比は計測点を通過する火炎の速度や曲率には依存しないことなどが明らかとなった．

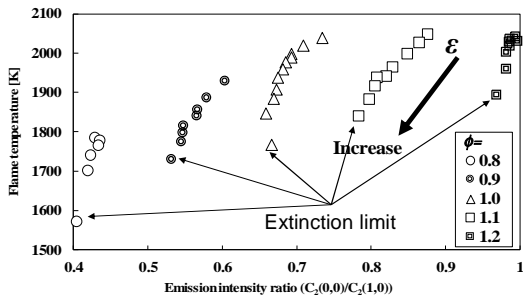


図 4  $C_2$  スワンバンドの発光強度比と火炎温度の関係

次に、平成 28 年度は、平成 27 年度に開発を行った複数のコアを有するバンドルファイバを用いた多点同時計測システムの性能評価を行った．

乱流予混合火炎の三次元挙動や局所的な火炎温度および燃料と酸化剤の混合比を診断する手法の確立に向けて、層流予混合火炎を対象に、一辺が 2mm の正四面体の頂点に配置された各計測点を通過する火炎の角度や速度、また火炎の曲率を変化させ、各計測点からどのような化学発光信号が得られるのかを詳細に調査した．多点より得られた化学発光信号を解析することで、計測点と火炎面の幾何学的な相対関係や火炎面の移動速度等、火炎面の三次元挙動を正確に解析可能であることが確認できた．

カセグレン光学系を用いた計測では、計測点、すなわち集光率の高い領域、以外からの光も集光し、得られる信号はそれらの総和として計測される．乱流火炎のように計測点の近傍にも火炎面が存在するような場合、それらの影響により、診断しようとする火炎面以外からの発光が影響し、正確な診断が行えない可能性がある．そこで、乱流火炎の計測に向けた基礎的なデータの収集を目的に、対交流バーナを用いて形成した双子火炎を対象とした化学発光計測を行い、各計測点近傍に複数の火炎面が同時に存在する場合の化学発光信号に及ぼす影響を調査した．

上記の基礎実験により、乱流予混合火炎の燃焼診断に向けた基礎的なデータを十分に蓄積することができた．

平成 29 年度は、乱流予混合火炎を対象とした化学発光計測を行い、これまでに得られた層流予混合火炎の結果と比較することで、

層流予混合火炎から得られた知見が乱流予混合火炎の計測に適用できるか調査した．その結果、図 5 に示すように乱流予混合火炎において計測された OH/CH、 $C_2(1,0)/C_2(0,0)$ は、計測点を通過する局所的な火炎の状態、すなわち火炎伸張による温度変化や濃度変化に依存して変動するものの、その最頻値は層流予混合火炎のものと一致することなどを明らかにした．このように、層流予混合火炎から得られた知見に基づいて、乱流予混合火炎における局所的な火炎温度の計測手法の確立を行った．

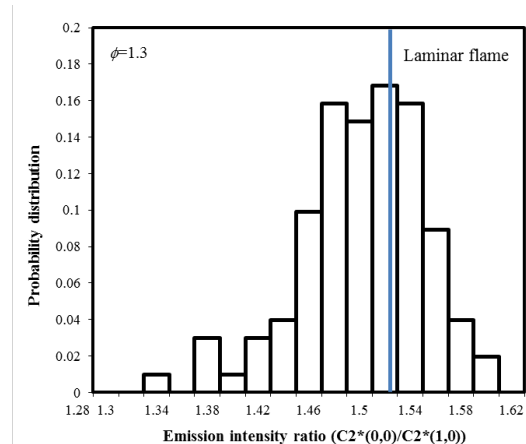
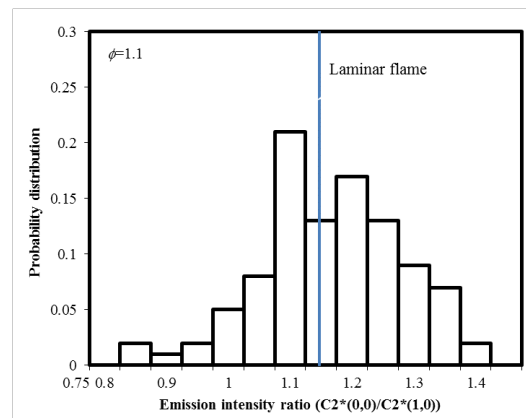
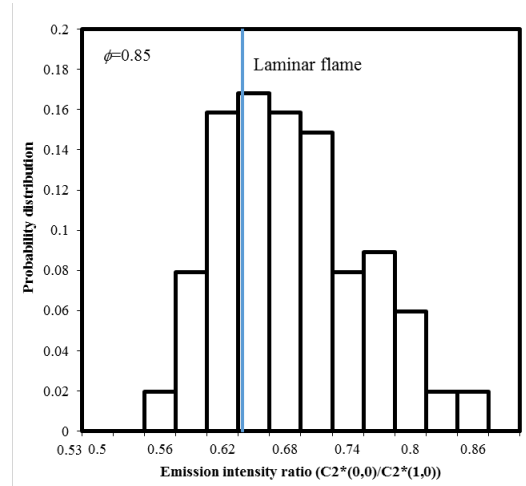


図 5 乱流火炎における  $C_2(1,0)/C_2(0,0)$

<引用文献>

- (1) F. A. Williams, Combustion and Flame, Vol.22, 1976, 269-270.
- (2) J. Sato, Proceedings of Combustion Institute, Vol.19, 1982, 1541-1548.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

川添 裕三, 橋本 英樹, 森上 修, 村瀬 英一, 古川 純一, 化学発光分光法による火炎温度の診断, 日本機械学会論文集, 査読有, 83 巻 853 号, 2017  
DOI:<https://doi.org/10.1299/transjsme.17-00159>

〔学会発表〕(計 2件)

矢能 章禎, 牧田 庸寛, 橋本 英樹, 齋藤 博史, 古川 純一, 化学発光分光法による乱流予混合火炎の燃焼診断に関する研究, 第 28 回内燃機関シンポジウム, 2017

Yuzo Kawasoe, Hideki Hashimoto, Osamu Moriue, Eiichi Murase, Junichi Furukawa, Emission Spectroscopy of the C2 Swan Bands to Estimate Temperature of the Near-Extinction Flamelets of Turbulent Premixed Flames, 11th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2017

6. 研究組織

(1)研究代表者

橋本 英樹 (HASHIMOTO Hideki)  
神戸市立工業高等専門学校・機械工学科・准教授  
研究者番号: 80383488