

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 18 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420162

研究課題名(和文) 微小火炎の燃焼促進に最適な火炎サイズ・伸長度の決定因子の解明

研究課題名(英文) A study on the optimum flame size and Karlovitz number to improve the burning velocity for meso-scale spherical laminar flames

研究代表者

中原 真也 (NAKAHARA, Masaya)

愛媛大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20315112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、火炎半径5mm程度以下の微小サイズの火炎の燃焼促進を目的に、燃焼速度に最適な火炎サイズや火炎伸長度が決定される因子に着目して検討した。その結果、その最適値は、層流燃焼速度や化学反応特性時間に関わらず、燃料や希釈ガスの種類および当量比により決定される傾向にあることを明らかにした。また、微小な火炎領域で燃焼が促進される混合気に対して、分子拡散特性に着目し、その増加効果を定量的に推定する手法を提案した。さらに、微小火炎の燃焼速度特性を支配する因子としてルイス数やマークスタイン数が重要であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)： This study is performed to experimentally investigate the factors that determine the optimum flame radius and Karlovitz number to improve the burning velocity of meso-scale spherical laminar flames in the range of flame radius < about 5mm, in an attempt to establish combustion enhancement methods of meso-scale flames.

As a result, it was found that the observed optimal values are little dependent on the laminar burning velocity or characteristic chemical time, but much more on the fuel types, dilution gas types and the equivalence ratio. We also proposed a method to estimate the increase in the burning velocity and equivalence ratio caused by molecular diffusion effect. Finally, it became clear that the Lewis number and the Karlovitz number play important roles in the determination of the burning velocity of meso-scale flames.

研究分野：燃焼工学、熱工学

キーワード：予混合燃焼 微小火炎 燃焼速度 火炎サイズ 火炎伸長 ルイス数 マークスタイン数

### 1. 研究開始当初の背景

高性能が進む携帯可搬型機器や MEMS 用動力源の一つとして、コイン大またはそれ以下の超小型の燃焼器を用いた発電システムや熱源が注目されている<sup>1)</sup>。これは、燃焼エネルギーがリチウムイオン等の電池に比べ重量当たりで高エネルギー密度を有するため、例えば熱効率を考慮しても動力源の小型化が図れ、かつ長時間・安定して作動させられる可能性があるからである。

一方、超小型燃焼器では、系のスケールが小さい故に表面積対体積比が大きく熱損失の増大や消炎距離の観点からいかに燃焼を安定的に維持するかが課題となる。そこで、火炎核の形成、消炎距離、最小点火エネルギーと電極直径や間隙との関係、またはマイクロチャンネル内の燃焼特性やマイクロ拡散火炎については詳細に研究<sup>1)</sup>がなされている。

さらに、系のスケールが小さいことから乱れが存在したとしても相対的な乱れの尺度を表すレイノルズ数は小さく、一般的なサイズのマクロスケールの燃焼場のように乱れの利用による燃焼負荷増大は困難であると推測できる。

しかしながら、本研究のような定容燃焼器内の微小球状伝ば火炎を対象とし、内燃機関等の設計に不可欠な微小な火炎の燃焼速度特性の系統的な把握、さらには燃焼促進機構の解明、それらのモデル化を目指した研究は国内外共に見あたらない。

これは、これまでの研究が、単に安定的な燃焼が予想される量論混合比の燃料 - 空気混合気に対するものがほとんどであり、そこでは火炎半径や伸長による層流燃焼速度の変化が小さく、分子拡散特性の重要性<sup>2)</sup>が見落とされていたためと考えられる。

さらに、これまででは、炭鉱等の安全工学上、または内燃機関でのサイクル変動等の点火安定性の観点から着火するか否か、すなわち最小点火エネルギーや消炎距離または電極仕様の影響に着目した研究が大半であり、燃焼促進に最適な火炎サイズや伸長という視点を持っていなかったためであると推察できる。

### 2. 研究の目的

これまでに既報<sup>2)</sup>で、微小な火炎には一般的なサイズの層流火炎の燃焼特性からでは議論できない混合気条件が存在すること、燃焼速度に対して最適な火炎サイズや伸長が存在すること等を実験的にはじめて明らかにしてきた。

そこで、本研究では、この知見を基に、超小型燃焼器での燃焼促進はもとより希薄燃焼機関等での安定的な着火促進手法の開発、さらには火炎や爆発事故の防止の観点から

も重要となる、微小火炎の燃焼促進機構を解明することを目的とした。具体的には、微小な球状伝ば層流火炎に対して、微小火炎の分子拡散による燃焼速度促進効果の定量化法の提案、燃焼促進に最適な火炎サイズや伸長度を決定する因子の解明である。

### 3. 研究の方法

本研究では、一般的なサイズの火炎(以後、マクロ火炎と称す)のいわゆる層流燃焼速度  $S_{L0}$  を揃えた燃料 - 酸素 - 希釈ガス混合気を使用した。混合気を構成する分子の拡散特性が微小火炎の燃焼速度特性に与える影響を詳細に検討するため、燃料には、酸素より分子拡散速度が大きな水素やメタンを、拡散速度が小さなプロパンの三種類を対象とした。さらには、二成分燃料も用いた。また希釈ガスには、酸素とほぼ拡散速度が等しい一般的な窒素に加え、拡散速度が同等のアルゴン(Ar)、拡散速度が遅い二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、さらには拡散速度が速いヘリウム(He)の四種類を対象とした。当量比の影響を検討するために、 $S_{L0}$  は基本的には希釈量を調整することにより 25 cm/s などに揃え、当量比 $\phi$ は希薄から過濃までの広い範囲を対象とした。また化学反応特性時間( $\eta_0 / S_{L0}$ )の影響を検討するために、 $S_{L0}$  を 15 ~ 90 cm/s に揃えた混合気も対象とした。ここで、 $\eta_0$  は予熱層厚さを示す。

微小火炎の実験には、図 1 に示す定容燃焼器を使用した。内径が約 100 mm の球形に近い定容燃焼器で、向かい合う側面 4 面に直径 85 mm の観測窓、他の上下 2 面には直径 90 mm の多孔板を有する。多孔板後方の遠心ファンを回転させることで、分圧法により注入した各ガスを混合できる。燃焼実験は、常温常圧下、静止混合気中で、コンデンサを用いた容量放電式によりほぼ燃焼室中央で火花点火させた。

微小火炎の観測には、連続シュリーレン写真撮影法を使用した。撮影は、ダークポイントおよび焦点距離 800 mm のレンズを用い、高速ビデオカメラ(448×448 画素, 8bit, 10,000

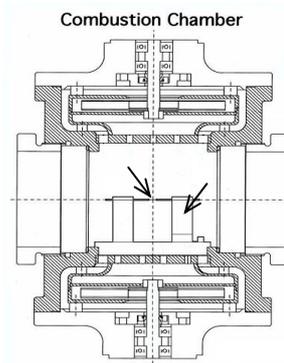


図1 定容燃焼器概要(微小火炎用)

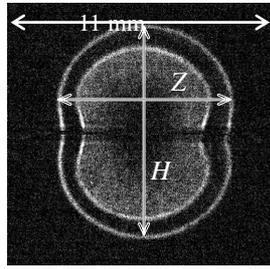


図2 火炎半径の算出法 (シュリーレン写真)

fps)で行った。得られた画像データはPCに送り、エッジ処理等を行った後、火炎面検出、火炎半径、および火炎伝ば速度から燃烧速度の算出を行った。なお1画素の大きさは実像上で約0.026 mmである。

微小火炎の実験時には図1のように点火用電極支持台を燃烧器内へ設置した。点火用電極は検討した結果、電極直径Dは0.1または0.2 mmおよび間隙Wは0.5~3.0 mm (材質: SUS)とし、コンデンサ容量から算出した点火エネルギー $E_i$ は1.6~217 mJと可変可能とした。なお、燃料の種類や $\phi$ 等により各混合気の $E_i$ は本実験装置での最小点火エネルギー近傍の値であり、点火エネルギーが火炎核の形成に極力影響を与えない条件を選定した。なお、燃烧実験は、各条件で5回以上行った。

本研究では、図2に示す火炎上端から下端までの長さHと、上方火炎核の横方向の長径Zから算出できる $[(Z+H)/4]$ を $r_f$ と定義した。次に、外向きに伝ばする球状層流火炎の平均燃烧速度 $S_{Li}$ を次式により算出した。

$$S_{Li} = [(\rho_b / \rho_u) \cdot dr_f / dt] \quad (1)$$

ここで、 $\rho_b$  および  $\rho_u$  は既燃ガスおよび未燃混合気の密度、 $dt$  は画像取り込み時間間隔(=0.1 ms)である。

本研究では、撮影範囲により、 $r_f$  が1~5 mm程度を微小火炎と、概ね7 mm以上をマクロ火炎とし、それぞれ観測・解析対象とした。

また、微小火炎の局所火炎性状を検討するために、イオン電流波形を得るために静電探針法およびカセグレン光学系およびバンドパスフィルターを用いた局所火炎自発光-分光計測を試みた。

さらに、超小型燃烧器での壁の影響を検討するために、内径10 mmで奥行12 mmの円筒状の燃烧器において、奥行き長さ変更した検討を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 最適値に与える化学反応特性時間の影響

微小な火炎サイズ領域で、燃烧速度に対して最適な火炎半径や火炎伸長度に与える化学反応特性時間の影響について検討した。

図3に、一例として水素またはプロパンを

燃料とした、または希釈ガスを窒素またはアルゴンとした混合気において当量比 $\phi$ を一定で層流燃烧速度 $S_{L0}$ を15~90 cm/sに変化させた時の燃烧速度特性 $S_{L\infty}/S_{Li}$ と火炎伸長度を表すKarlovitz数 $Ka$ との関係を示す。なお、 $S_{L\infty}$ はマクロ火炎を対象に算出した火炎伸長を有しない時の $S_{Li}$ の値である。

図3からわかるように、 $S_{L0}$ の差異、すなわち化学反応特性時間の差異に因らず、燃烧速度に対する最適な $Ka$ 値は概ね変化しないことを明らかにできた。すなわち、燃烧速度に対する火炎伸長度の最適値は、燃料や希釈ガスの種類が同一であれば、当量比に強く依存することがわかった。

なお、 $\phi=1.0$ の水素-酸素-ヘリウム混合気では、 $S_{L0}$ を90 cm/s程度まで高めないと着火する混合気を作成できなかった。さらに、その微小火炎の燃烧特性は著しいものであることを明らかにした。

##### (2) 微小火炎の燃烧促進効果の定量化

微小な火炎領域で、分子拡散による燃烧を促進する効果を定量的に推定することを試みた。本研究では、燃烧速度促進効果量 $\delta S_{Li}$ と当量比増加効果量 $\delta\phi$ を燃烧促進効果量として、次の仮定のもと推定する手法を提案した。

- (i) 曲率を有する外向きに伝ばする球状層流火炎には、火炎伸長が線形的に燃烧速度に影響する。
- (ii) 火炎面直前の未燃領域での酸素と窒素のモル比は、変わらない。

ここで、仮定(i)は一般的な低伸長場における火炎伸長やMarkstein数の観点から、また仮定(ii)は両者の拡散係数がほぼ同等であることから妥

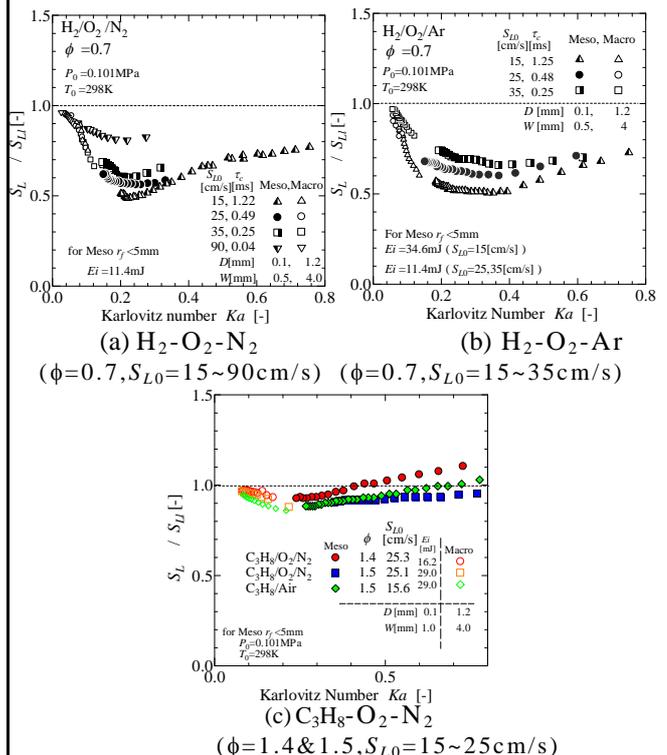


図3 火炎伸長度  $Ka$  と燃烧速度  $S_{Li}$  の関係

当であると考えられる。

図4に、図3(a)の $\phi=0.7$ の水素混合気に対しての結果を示す。

図4からわかるように、 $S_{L0}$ の差異によらず、低伸長領域では、水素の分子拡散に基づく当量比および速度の変化量は伸長度の増大、すなわち火炎サイズが小さいほど増加することを初めて定量的に明らかにできた。

(3) 炭化水素燃料での燃焼促進に与える希釈ガス、水素添加および当量比の影響

水素に比べて微小サイズでの燃焼促進が必要な炭化水素燃料の燃焼促進手法について検討した。

まず希薄プロパン混合気への水素添加による燃焼促進効果を検討した。図5(a)に、 $\phi=0.8$ で $S_{L0}=25\text{cm/s}$ に揃えた水素-プロパン混合気の燃焼速度 $S_{Li}$ と火炎半径 $r_f$ との関係を示す。

図5(a)からわかるように、水素添加により同一 $r_f$ の燃焼速度特性 $S_{Li}/S_{L\infty}$ は改善し、特に水素添加量 $\delta_H$ を0.8程度以上にするとその改善効果が大きいことを明らかにした。

さらに、プロパンおよびメタンへの二酸化炭素の効果について検討した。その結果の一例を図5(b)に示す。図5(b)中の $S_{Li}$ は $r_f=4\text{mm}$ での代表値を整理したものである。

図5(b)からわかるように、メタンおよびプロパンへの二酸化炭素は窒素より燃焼速度改善効果が大きい傾向にあること、ただしプロパンの過濃混合気に関してはその効果はほぼないことを明らかにできた

(4) 微小火炎の局所性状

数ミリサイズの微小な火炎の局所火炎性状を把握するために、静電探針法およびカセグレン光学系を用いた局所分光を試みた。

図6に、点火中心から1, 4, 7, 10mmでのCH自発光用バンドパスフィルターによる分光計測の結果の一例を示す。なお、検査体積0.2mm程度の分解能を有する。今後詳細な検討が必要であるが、半径5mm以下でも分光が可能であるシステムを構築できた。また同様に、静電探針による計測手法を構築できた。

(5) 狭あい空間での壁の影響

内径10mmの円筒状燃焼器で奥行きを12mmと6mmと変化させ、微小空間での壁の影響について検討した。その結果、火炎半径や伸長度に対する燃焼速度特性に差異は観察できなかったものの、圧力履歴には壁の影響と思われる傾向が観察されることを明らかにした。

(6) 燃焼促進に最適な火炎サイズや伸長度を決定する因子

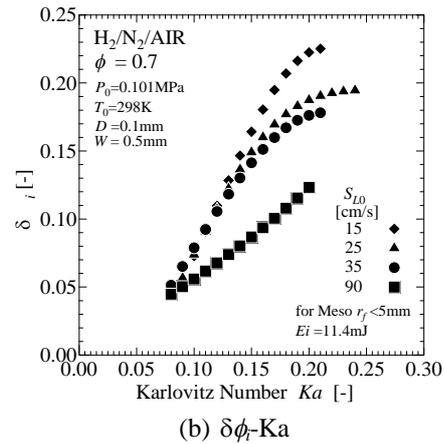
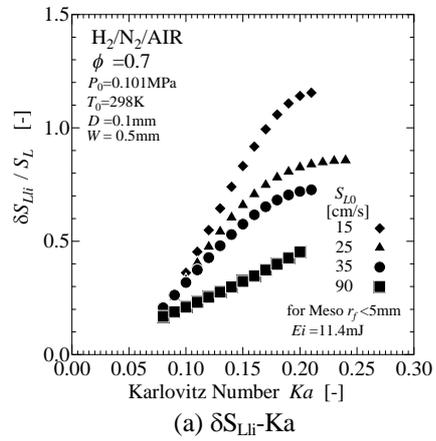


図4 燃焼速度促進効果量 $\delta S_{Li}$ と当量比増加効果量 $\delta\phi$  ( $\text{H}_2\text{-O}_2\text{-N}_2$ ,  $\phi=0.7$ ,  $S_{L0}=15\sim 90\text{cm/s}$ )

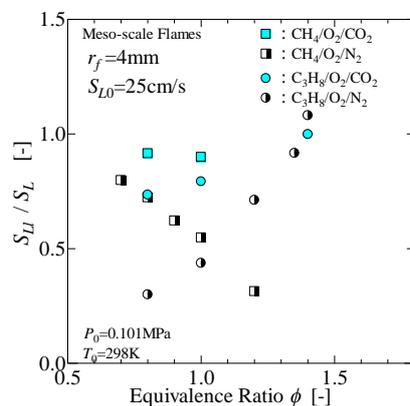
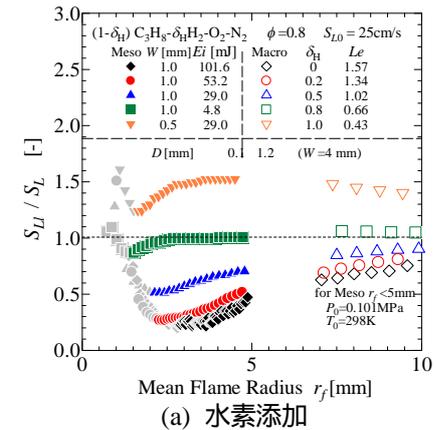


図5 炭化水素予混合微小火炎の燃焼促進

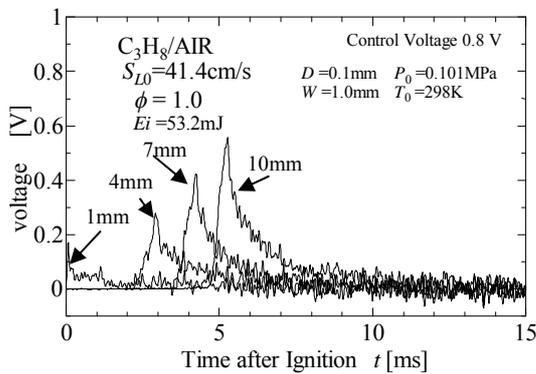
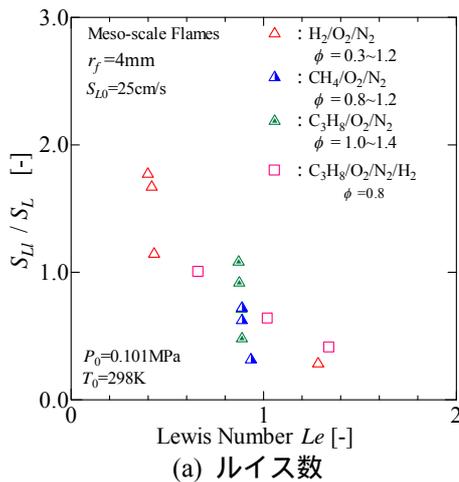
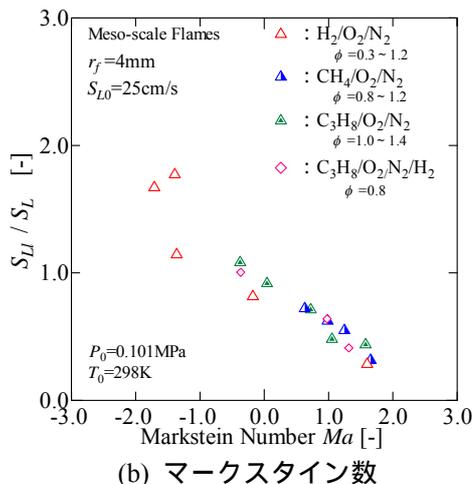


図6 微小火炎の局所 CH 自発光強度



(a) ルイス数



(b) マークスタイン数

図7 微小火炎の燃焼速度の整理

最後に、微小火炎の燃焼速度に最適な火炎サイズや火炎伸長度が決定される因子、さらには微小火炎の燃焼モデルを構築するために、ルイス数  $Le$  または Markstein 数  $Ma$  の影響について検討した。その結果の一例を図7に示す。ここでは、図5(b)と同様に代表速度  $S_{Li}$  で整理している。

図7からもわかるように、 $Le$  および  $Ma$  が小さくなるほど、燃焼速度が増大する傾向にあり燃焼特性が改善することがわかる。さらに、 $Ma$  の方が、 $Le$  より燃焼速度モデルの構

築にはより適していることを初めて実験的に明らかにできた。また、燃焼速度に対して最適な火炎サイズや伸長度が存在する混合気は、 $Le$  では1より小さく、 $Ma$  では0より小さい混合気であることを明らかにした。

#### < 引用文献 >

- (1) Maruta, K., "Micro and mesoscale combustion", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33(2011), pp.125-150.
- (2) 例えば：中原真也，城戸裕之，吉光信太郎，水素微小球状伝ば層流火炎の基礎燃焼速度特性，日本機械学会論文集 B 編，72 巻 724 号，2006、pp.3166-3173.

#### 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)

- (1) 中原真也、他4名、水素-プロパン-空気希薄混合気の乱流燃焼速度に与える局所燃焼速度特性の影響、日本機械学会論文集、査読有、81 巻 822 号、2015、pp.1~13 . DOI: 10.1299/transjsme.14-00318
- (2) Masaya NAKAHARA、他3名、Effect of Dilution Gas on Burning Velocity of Hydrogen-Premixed Meso-scale Spherical Laminar Flame、*Proceedings of the Combustion Institute*、査読有、Vol.35、2015、pp. 639~646 . DOI: 10.1016/j.proci.2014.05.050
- (3) 中原真也、他4名、水素-酸素-アルゴン理論混合気の乱流燃焼速度に与える局所燃焼速度特性の影響、日本機械学会論文集 B 編、査読有、79 巻 804 号、2013、pp.1675~1684 . DOI: 10.1299/kikaib.79.1675

[学会発表](計13件)

- (1) 関子和樹、中原真也、他5名、超希薄水素-プロパン混合気の微小球状層流火炎の燃焼速度特性に関する実験的研究、日本機械学会中国四国学生会第46回学生員卒業研究発表講演会、2016年3月8日、愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市) .
- (2) Wataru IKEGAMI、Masaya NAKAHARA、他3名、An Experimental Study on Burning Velocity Characteristics for Meso-scale Propagating Spherical Laminar Flames of Stoichiometric H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Dilution Gas Mixtures、JCREN2015、2015年12月6日、愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山

- 市) .
- (3) 池上航、中原真也、他 2 名、超希薄プロパン混合気の微小球状層流火炎の燃焼特性に与える CO<sub>2</sub> の影響に関する研究、第 53 回燃焼シンポジウム、2015 年 11 月 16 日、つくば国際会議場(茨城県つくば市) .
  - (4) 中原真也、他 3 名、CO<sub>2</sub> 添加プロパン予混合微小層流火炎の燃焼速度特性に関する実験的研究、熱工学コンファレンス 2015、2015 年 10 月 25 日、大阪大学吹田キャンパス(大阪府吹田市) .
  - (5) 柳原至、池上航、中原真也、超希薄プロパン-二酸化炭素-酸素予混合微小球状伝ば火炎の燃焼速度特性に関する実験的研究、2015 年度西日本エンジンシステム研究会夏季セミナー、2015 年 9 月 11 日、ふれあいパーク(山口県岩国市) .
  - (6) 中原真也、他 3 名、水素 - 酸素 - 希釈ガス理論混合気の微小球状伝ば層流火炎の燃焼速度特性に関する実験的研究、第 52 回日本伝熱シンポジウム、2015 年 6 月 5 日、福岡国際会議場(福岡県福岡市) .
  - (7) 丸山勇太、中原真也、他 2 名、水素微小球状層流火炎の燃焼速度特性に及ぼす希釈ガスの影響に関する研究、第 52 回燃焼シンポジウム、2014 年 12 月 3 日、岡山コンベンションセンター(岡山県岡山市) .
  - (8) 中原真也、他 3 名、メタン理論予混合微小球状伝ば層流火炎の燃焼促進に関する実験的研究、熱工学コンファレンス 2014、2014 年 11 月 8 日、岡山コンベンションセンター(岡山県岡山市) .
  - (9) 丸山勇太、池上航、中原真也、水素-酸素-希釈ガス微小球状伝ば火炎の燃焼特性に及ぼす層流燃焼速度の影響に関する研究、2014 年度西日本エンジンシステム研究会夏季セミナー、2014 年 8 月 30 日、国立淡路青少年交流の家(兵庫県南あわじ市) .
  - (10) Masaya NAKAHARA、他 3 名、Effect of Dilution Gas on Burning Velocity of Hydrogen-Premixed Meso-scale Spherical Laminar Flame 、 35th International Symposium on Combustion、2014 年 8 月 3 日~8 月 8 日、San Francisco, USA .
  - (11) 徳永修一、中原真也、他 2 名、水素微小球状伝ば層流火炎の燃焼速度特性に及ぼす化学反応特性時間の影響に関する研究、第 51 回燃焼シンポジウム、2013 年 12 月 4 日、大田区産業プラザ Pio(東京都大田区) .
  - (12) 丸山勇太、徳永修一、中原真也、水素微小球状伝ば火炎の燃焼特性に及ぼす層流燃焼速度の影響に関する研究、日本機

械学会 2013 年度西日本エンジンシステム研究会夏季シンポジウム、2013 年 9 月 1 日、岡山県青少年教育センター閑谷学校(岡山県備前市) .

- (13) 中原真也、他 3 名、プロパン-空気微小球状伝ば層流火炎の燃焼速度特性に関する実験的研究、第 50 回日本伝熱シンポジウム、2013 年 5 月 31 日、ウェスティンホテル仙台(宮城県仙台市) .

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

中原 真也 ( NAKAHARA, Masaya )  
愛媛大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：20315112

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

向笠 忍 ( MUKASA, Shinobu )  
愛媛大学・大学院理工学研究科・講師  
研究者番号：20284391