

令和元年6月6日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06124

研究課題名(和文) ガス流動中での微小火炎の燃焼促進に最適な着火条件に関する研究

研究課題名(英文) A Study on the Optimum Ignition Condition for Improving Meso-scale Flames in High-intensity Turbulence Flow

研究代表者

中原 真也 (Nakahara, Masaya)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号：20315112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、次世代高性能エンジンに求められる超希薄かつ高ガス流動場での着火促進技術の構築を目指し、研究代表者がこれまでに明らかにした微小な火炎や乱流燃焼場での反応物の分子拡散特性の重要性を応用し、ガス流動中での微小火炎の燃焼促進に最適な着火条件を解明することが目的である。具体的には、水素-炭化水素-希釈ガス-酸素予混合微小火炎を対象に、等方性乱れ場およびスワール流場の2種類のガス流動場に対して、着火特性を詳細に検討した。その結果、燃焼促進に最適な着火条件は、分子拡散特性を考慮できるルイス数に着目することにより実現の可能性のあることを明らかにできた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた大きな成果として、主流の無い等方的な乱れ場と主流が存在するスワール流場と大きく異なる乱流特性場に対して、安定的な着火および火炎核形成は、反応物の拡散特性と深い関わりがあるルイス数により整理・モデル化できる可能性を明らかにしたことである。これら成果は、より優れた超小型燃焼機器からマイクロガスタービン等の内燃機関、高強度ガス流動場での超希薄燃焼などの着火促進手法、火炎核の成長抑制による火災や爆発事故を防ぐ燃焼抑制技術、予混合乱流火炎の局所燃焼機構のモデル化、などの開発につながるものであり意義がある。

研究成果の概要(英文)： With the increasing demands on developments of high-thermal efficiency and low-emission SI engines, which need the assured flame kernel development for reducing misfire, understanding for ignition and meso-scale flames is important under high-intensity turbulence flow for ultra-lean mixtures.

The purpose of this study is to establish the optimum ignition condition for improving meso-scale flames in high-intensity turbulence. This study is performed to investigate the effects of equivalence ratios, hydrogen additional rates to hydrocarbon and turbulence intensity on the ignition and combustion characteristics such as minimum ignition energy, ignitability and maximum combustion pressures for the two types of turbulence, isotropic turbulence and swirl flow. As a result, it was clarified that the optimum ignition condition for improving combustion could be realized by focusing on the Lewis number taking the molecular diffusion characteristics into consideration.

研究分野：熱工学、特に燃焼工学

キーワード：予混合燃焼 着火促進 微小火炎 燃焼速度 火炎サイズ 火炎伸長 ガス流動 ルイス数

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

益々高性能化が進む携帯可搬型機器や MEMS、さらに近年は無人機やロボット用動力源の一つとして、長時間・安定した作動が可能な従来サイズより小型もしくは超小型の燃焼器を用いた発電システムや熱源並びにエンジンが注目されている¹⁾。一方、燃焼器の小型化を図るほど、系のスケールが小さい故に表面積対体積比が大きくなり熱損失の増大や消炎距離の観点からいかに着火や燃焼を安定的に維持するかが課題となる。

さらに、近年の環境負荷低減化の要求から超希薄燃焼場での安定的な着火促進手法の開発、さらには火災や爆発事故の防止の観点からも、ガス流動中での微小な火炎の燃焼特性を把握することが重要な課題である。そこで、一般的なサイズの乱流火炎を用いた検討から乱れと着火性の関係について議論された例²⁾が見受けられるが、その確実な火炎伝ばの実現の礎となる点火直後の微小な火炎の燃焼特性については未解明である。

加えて、これまでは炭鉱等の安全工学上の観点からも、ガス流動が無い場で、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る。

また、本研究のような定容燃焼器内の点火直後の微小球状伝ば火炎と燃焼機器等の設計に不可欠なガス流動の両者を対象とし、混合気の分子拡散特性に着目した微小な火炎の燃焼特性の系統的な把握、さらには燃焼促進に最適な着火条件の解明、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、研究代表者が明らかにした燃焼促進に最適な火炎サイズや伸長が存在するという知見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

研究代表者は、これまでに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燃焼速度に最適な火炎サイズや伸長が存在することを明らかにしてきた。そこで、本研究では、この知見を応用し、超小型燃焼器や希薄燃焼などの実機を想定し、ガス流動中での微小火炎の燃焼促進に最適な着火条件を解明することが目的である。具体的には、水素-炭化水素-希釈ガス-酸素予混合微小火炎を対象に次の事項を明らかにする。

- ①等方性乱れ場および主流が存在するスワール流場の2種類のガス流動場における微小火炎の燃焼促進に最適な着火条件の決定因子の検討する。
- ②微小火炎の燃焼促進やガス流動強度と放電の挙動や性状との着火過程との相互関係を検討する。
- ③反応物の分子拡散特性やルイス数または Markstein 数に着目した、ガス流動中での微小火炎の燃焼促進に最適な着火条件の予測モデルを検討する。

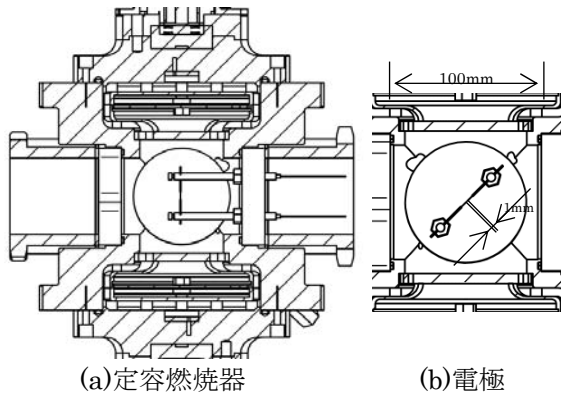
3. 研究の方法

本研究では、ガス流動中での微小火炎の燃焼促進に最適な着火条件を明らかにするために、等方性乱れ場およびスワール流場の2種類の燃焼場について着火特性および微小火炎の燃焼特性を把握し評価する。さらに、燃料の分子拡散特性の影響、および炭化水素-空気混合気では希薄可燃限界以下の当量比 0.5 での着火・燃焼促進手法を、並びに広い範囲のルイス数や Markstein 数に着目した検討を実施するために混合気には、当量比 ϕ を 0.5、0.8 および 1.4 とし、 S_{L0} を 25cm/s に揃え水素添加量 δ_H を 0、0.2、0.5、0.8、1.0 と変化させたプロパン-水素-酸素-酸素混合気 $[(1-\delta_H)C_3H_8/\delta_H H_2/O_2/N_2]$ を主な対象とした。ここで燃料には、LPG の主成分でもあり酸素よりも分子拡散速度が遅いプロパン (C_3H_8) と、燃焼特性のみならず分子拡散特性に優れた水素 (H_2) を用いた。なお、 S_{L0} は火炎が十分に成長した、伸長を概ね有しない球状層流火炎の燃焼速度 (S_{L0}) であり、圧力履歴より算出した。

(1) 等方性乱れ場：等方性乱れ場に対しては、図 1 に示す中心付近に定常的に等方性乱れ場を得られる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 の観測窓が取り付けられており、そのうち 1 つの窓は点火電極と一体になっている。燃焼器上下 2 面には直径 90 mm の多孔板を有し、その後方にファンが設置してある。ファンを上下同一の回転数で回転させることで、燃焼室内に等方性乱れ場を概ね発生させることができる。ここでは、ファンの回転数を 1000 rpm および 5000 rpm とし、乱れ強さ u' は 0.35 m/s と 1.76 m/s とした。なお、積分スケール L_f およびテイラーのマイクロスケール λ_g は、それぞれ定容器なので u' に対する変化が小さく概ね 2.9 mm と 1.8 mm 程度である。また $u' = 0$ m/s の層流場での燃焼実験も実施した。

観測窓に取り付けた点火電極は、上下ファンから発生される等方性乱れ場の妨げにならないように図 1 (b) に示すように 45°傾けて設置している。さらに、点火電極(材質:SUS)は、着火特性に与える影響を極力小さくするために、電極直径 D を 0.1 mm とし、電極間隙 W は、 $\phi=0.5$ と $\phi=0.8$ のプロパン混合気および $\phi=1.4$ の水素混合気は 3.0 mm、それ以外の混合気は 1.0 mm とした。

燃焼実験は、常温常圧下で、分圧法により上記の混合気を燃焼器に充填し、所定の乱れ強さの下で、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する。本研究では、コンデンサ容量を調整することで点火エネルギーを 0.8 mJ から 101.6 mJ まで変化させることができる。そして各混合気の最小点火エネルギー $E_{i_{min}}$ を各乱れ強さの条件下で決定した。なお、 $E_{i_{min}}$ は火花放電により火炎核が形成され火炎伝ばに至る確率が 50% となる点火エネルギーと



(a)定容燃焼器 (b)電極
図1 等方性乱流用定容燃焼器

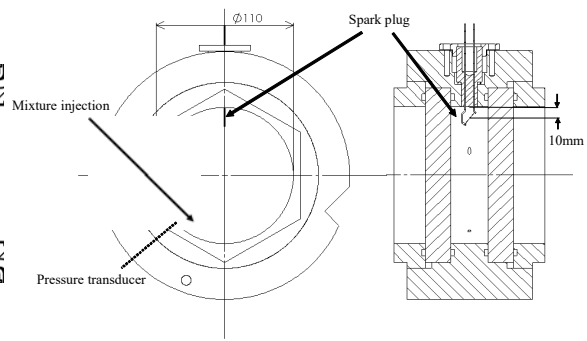


図2 スワール流用定容燃焼器

した。

さらに、層流場および乱流場で微小火炎が伝ばする様子を、連続シュリーレン写真撮影法を使用し観測した。ここでは、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(512×512 画素, 8 bit, 5,000~10,000 fps, 露光時間 1 μ s)で撮影した。なお解像度は約 0.027 mm/pixel である。

(2) スワール流場：本研究で使用した燃焼器は、図2に示すエンジンの上死点付近の平皿型燃焼室を模した直径 110 mm, 深さ 30 mm の扁平円筒状で、容積 285 cm³ の定容燃焼器を用いた。両側面に直径 140 mm の石英製の観測窓を配置することで火炎を観察することができる。また、シリンダ内に作成・圧縮した予混合気を、電磁バルブを制御して燃焼器内へ接線方向に噴射することで高速のスワール流を発生できる。さらに、点火電極は、燃焼器壁面からの距離 10 mm に設置し、着火特性に与える影響を小さくするために、直径を 0.2 mm, 間隙を 1.0 mm とした。燃焼器には圧力センサを取り付け、燃焼器内の圧力履歴を得ることができる。火炎の可視化法には連続シュリーレン写真撮影法を使用し、撮影には焦点距離 150 mm のレンズを用い、高速度ビデオカメラ(512×512 画素, 0.24 mm/pixel, 8 bit, 2000~5000 fps, 露光時間 10 μ s)を使用した。さらに、燃焼効率検討するためにガスクロマトグラフを用いた。

燃焼実験では、点火タイミングを調整することによって、点火位置における点火時の周方向流速 $u_{1,ig}$ を 0, 12, 17, 30 および 40 m/s と変化させ、コンデンサ容量を調整することにより、主に点火エネルギー $E_i=29$ mJ で実験を行った。なお、 $\phi=1.4$ の混合気は、 $u_{1,ig}=0, 17$ および 30 m/s の 3 条件で実験した。また、燃焼ガス分析は $u_{1,ig}=0, 17$ および 30 m/s の 3 条件で行った。

4. 研究成果

(1) 等方性乱れ場：図3に、得られた結果の一例として $\phi=0.8$ と 1.4 の層流場での最小点火エネルギー $E_{i_{minL}}$ および u' が 0.35 と 1.76 m/s における乱流場での最小点火エネルギー $E_{i_{minT}}$ と水素添加量 δ_H との関係を示す。図3から、電極間隙 W の異なる場合を除いて、 $\phi=0.8$ の場合、いずれの u' においても、 δ_H が増加するにしたがい概ね $E_{i_{minL}}$ および $E_{i_{minT}}$ は減少する傾向を示すこと。さらに、 δ_H が 0 と 0.2 では、 u' が增大するにしたがい $E_{i_{minT}}$ が増加する傾向を示すのに対し、 δ_H が 0.5 を超えると u' に関わらず概ね同等の最小点火エネルギーであることがわかる。なお、 $\phi=0.5$ の場合は $\phi=0.8$ と同様の傾向を示した。一方、 $\phi=1.4$ の場合、概ね δ_H に対して $\phi=0.8$ と逆の傾向を示す。このように、 S_{L0} を揃えた混合気ではあるが、希薄と過濃混合気で水素添加および乱れ強度の影響が大きく異なることが明らかにできた。

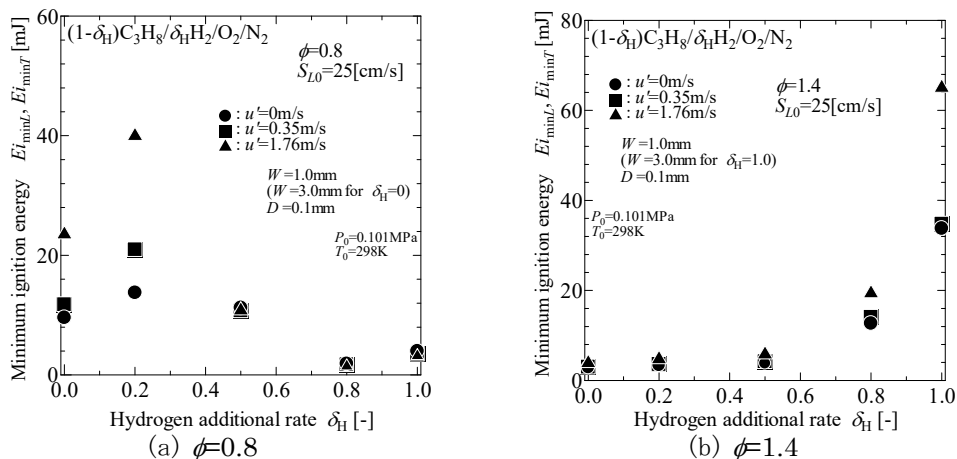


図3 最小点火エネルギーと水素添加量および乱れ強さとの関係[等方性乱れ場]

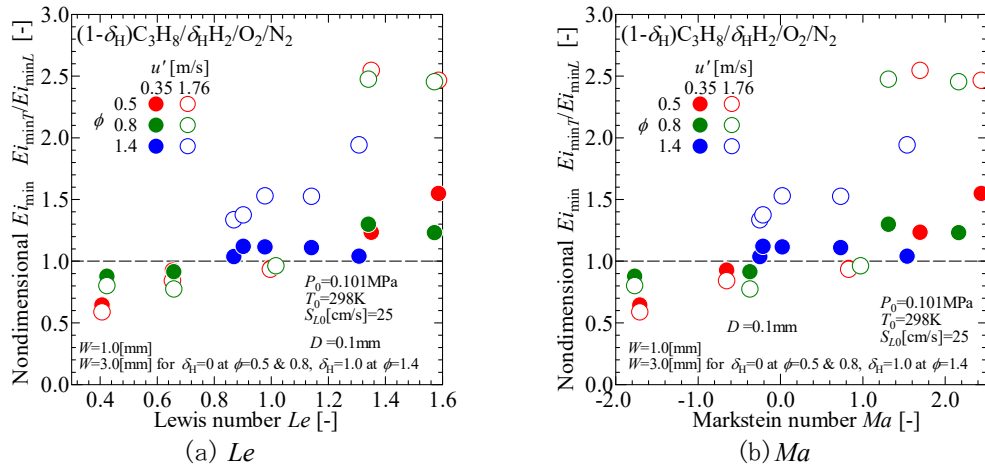


図4 最小点火エネルギーとルイス数または Markstein 数との関係[等方性乱れ場]

次に、分子拡散特性やルイス数 Le または Markstein 数 Ma に着目し、着火特性の支配因子およびモデル化の検討するために、無次元化最小点火エネルギー E_{minT}/E_{minL} を Le と Ma に対して整理した結果を図4に示す。図4から、乱流場の最小点火エネルギーは、 Le と Ma が大きいほど増大し着火特性が悪くなるのがわかる。さらに、 $Le < 約1$ と $Ma < 約0$ では、乱流強度を増大させると、一般的な乱れによる火炎伸長の影響とは逆で、着火しやすくなる傾向が確認できる。この傾向は、 Le が1より小さい物質移動が支配的な条件下では、分子拡散による影響が、乱れにより火炎に曲率が生じることにより助長され、着火が改善されると推測できる。

なお、より高火炎伸長場で検討するために、 S_{L0} を15 cm/s に揃えた水素またはプロパン混合気も対象とし、相対乱れ強度 u'/S_{L0} が12程度でも検討した。さらに、希釈ガスによる分子拡散特性の影響も検討するために窒素に加え二酸化炭素なども対象とした。

(2) スワール流場: まず、スワール流場での着火特性の検討結果の一例として、図5に $E_i=29mJ$ のときの $\phi=0.5$ と1.4の混合気の δ_H と点火確率の結果を示す。図5中のプロットは各 δ_H の $u_{1,ig}=0, 17$ および $30m/s$ のときの点火確率である。図5から、 $\phi=0.5$ では $u_{1,ig}$ の差異によらず δ_H の増加にともない点火確率が上昇する傾向を示し、さらに、 $\delta_H=0.8$ 以上では $u_{1,ig}$ が $30m/s$ の高ガス流動場でも安定して点火可能であることがわかる。一方、 $\phi=1.4$ では、逆に δ_H の増加にともない点火確率が低下する傾向を示し、さらに、 $\delta_H=0.8$ では $u_{1,ig}=0m/s$ から $u_{1,ig}=17m/s$ になると点火確率が上昇し、 $u_{1,ig}=30m/s$ になると点火確率が低下する傾向を示すことがわかる。これは、等方性乱れ場とは異なり連続シュリーレン写真の観測からスワール流場では、着火の後、火炎核は点火電極の下流に流されることから、 $u_{1,ig}=0m/s$ では電極の熱損失の影響が大きく、 $u_{1,ig}=30m/s$ では高ガス流動により火炎が伸長し消滅したことが原因であると考えられる。

さらに、燃焼特性を検討するために、最大燃焼圧力 P_M を化学平衡計算による定容断熱圧力 P_{TH} で無次元化した P_M/P_{TH} による検討や、燃焼ガスの未燃のプロパンのモル分率で表す未燃炭化水素量 U_{bHC} の計測も行った。

最後に、等方性乱れ場でも着火特性において重要な因子であることを明らかにしたルイス数 Le に対して、点火確率、 P_M/P_{TH} および U_{bHC} を整理した結果を図6に示す。

図6より、着火確率および最大燃焼圧力は Le が1付近で大きく傾向が変わり、 $Le < 1$ の条件、すなわちより分子拡散特性が支配的な場では、着火および燃焼特性が改善することがわかる。また、 U_{bHC} をからも Le が小さいほど、燃焼効率などの燃焼特性が改善することがわ

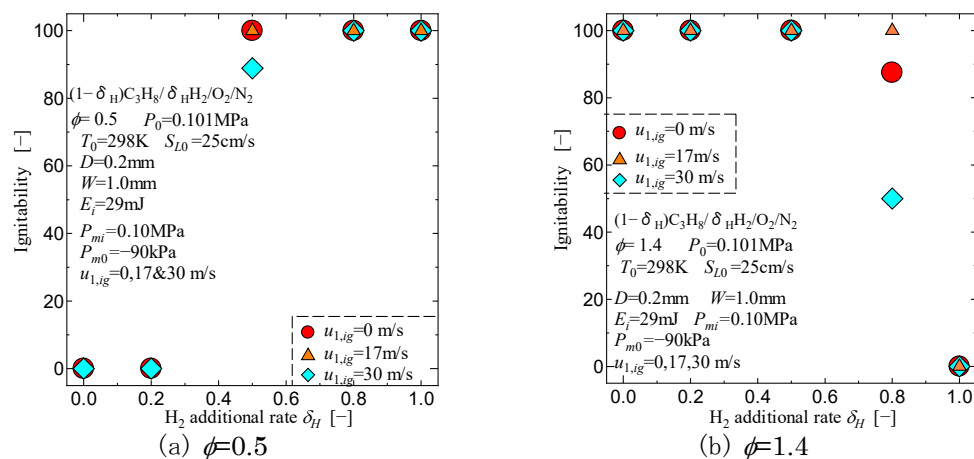


図5 点火確率と水素添加量またはスワール流速との関係[スワール流場]

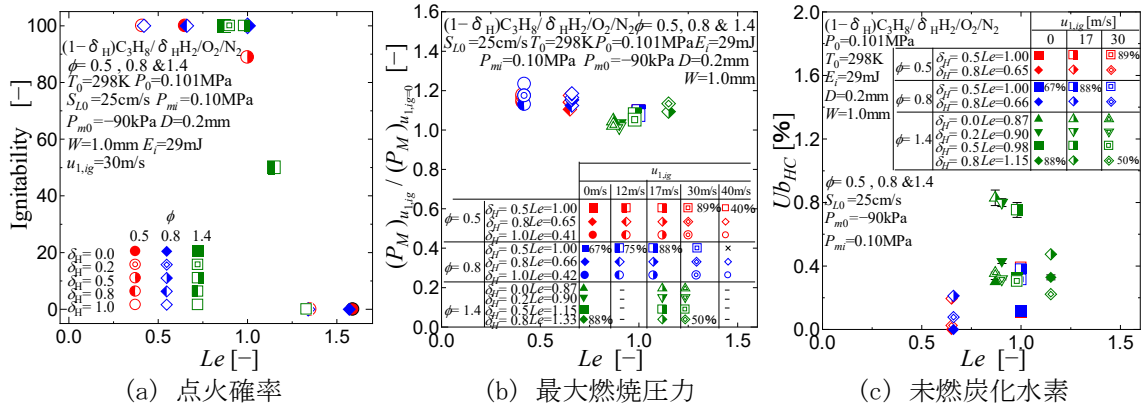


図6 点火確率, 最大燃焼圧力および未燃炭化水素とレイス数との関係[スワール流場]

かる。

以上より, 本研究で実施した二種類の基盤的なガス流動中での着火および微小火炎の燃焼特性の検討から, 燃焼促進に最適な着火条件は, 分子拡散特性に着目しレイス数を制御することにより実現の可能性があることを明らかにできた。

<引用文献>

- 1) Maruta, K., "Micro and mesoscale combustion", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33(2011), pp.125-150.
- 2) Shy, S.S., et al., "Ignition transition in turbulent premixed combustion", *Comb. Flame*, Vol.157(2010), pp.341-350.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 14 件)

- ① Takamasa Kihara, Hisanobu Kudo, Masaya Nakahara, Fumiaki Abe, Kenichi Tokunaga, Experimental Study on Burning Velocity Characteristics of Meso-scale Spherical Laminar Flames for Hydrogen-Propane Mixtures, The 7th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology (国際学会), 2018年12月.
- ② Haruki Maeda, Kyosuke Kurokawa, Masaya Nakahara, Fumiaki Abe, Kenichi Tokunaga, Experimental Study on Local Flame Displacement Velocity on Turbulent Burning Velocity for H2-C3H8 Mixtures, The 7th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology (国際学会), 2018年12月.
- ③ 黒川恭丞, 中原真也, 前田春樹, 阿部 文明, スワール流中でのプロパン混合気の着火特性に及ぼす水素添加の影響に関する実験的研究, 第56回燃焼シンポジウム, 2018年11月.
- ④ 工藤寿悦, 中原真也, 木原孝昌, 阿部文明, 乱流場での水素およびプロパン混合気の着火特性に関する実験的研究, 第56回燃焼シンポジウム, 2018年11月.
- ⑤ 中原真也, 工藤寿悦, 木原孝昌, 阿部文明, 超希薄水素-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希釈ガスの影響に関する研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス2018, 2018年10月.
- ⑥ 中原真也, 植田啓司, 黒川恭丞, 工藤寿悦, 阿部文明, スワール流場での希薄水素-プロパン混合気の着火特性に関する基礎研究, 第55回日本伝熱シンポジウム, 2018年5月.
- ⑦ 冏子和樹, 中原真也, 工藤寿悦, 阿部文明, 超希薄を含む水素-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研究, 第55回燃焼シンポジウム, 2017年11月.
- ⑧ 植田啓司, 中原真也, 許翌萱, 黒川恭丞, 石橋隆浩, 阿部文明, 超希薄プロパン混合気の乱流燃焼速度特性に与える水素および希釈ガスの影響に関する実験的研究, 第55回燃焼シンポジウム, 2017年11月.
- ⑨ Masaya Nakahara, Yuta Maruyama, Atsushi Ishihara, Fumiaki Abe, and Kenichi Tokunaga, A Study on Burning Velocity Characteristics of Meso-scale Spherical Laminar Flames For Lean-Hydrogen-Propane Mixtures, 26thICDERS (国際学会), 2017年8月.
- ⑩ 中原真也, 柳原至, 冏子和樹, 阿部文明, 水素-プロパン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54回日本伝熱シンポジウム, 2017年5月.
- ⑪ NAKAHARA Masaya, Fumiaki Abe, Kenich Tokunaga, Wataru Ikegami, FUNDAMENTAL BURNING VELOCITY CHARACTERISTICS FOR HYDROGEN ADDED LEAN-PROPANE PREMIXED MESO-SCALE SPHERICAL LAMINAR FLAMES, Asian Conference on Thermal Sciences 2017 (1st ACTS) (国際学会), 2017年3月.
- ⑫ 柳原至, 中原真也, 冏子和樹, 阿部文明, 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, 日本機械学会熱工学コンファレンス2016, 2016年10月.

⑬ 岡山康平, 中原真也, 植田啓司, 阿部文明, 水素添加超希薄プロパン - 希釈ガス予混合乱流火炎の局所燃焼速度特性に関する実験的研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2016, 2016年10月.

⑭ 中原真也, 兵頭光, 岡山康平, 阿部文明, 水素添加超希薄プロパン予混合乱流火炎の局所燃焼速度特性に関する研究, 第53回日本伝熱シンポジウム, 2016年5月.

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：向笠 忍

ローマ字氏名：Mukasa Shinobu

研究協力者氏名：阿部 文明

ローマ字氏名：Abe Fumiaki

※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。