

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03967

研究課題名(和文) 旋回流バーナを用いた種々の炭化水素燃料の超希薄燃焼メカニズムの研究

研究課題名(英文) Study on ultra-lean combustion mechanism of various hydrocarbon fuels in a swirl burner

研究代表者

西岡 牧人(Nishioka, Makihito)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：70208148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：これまでの研究で、旋回流バーナを用いて既燃ガスの再循環領域を伴う火炎を形成することで、メタン空気および水素空気の超希薄予混合燃焼が実現することが分かっている。本研究ではプロパン、正ブタン、正ヘブタンを対象として、分子量が比較的大きな燃料でも同じバーナで超希薄燃焼が可能かどうか確かめた。その結果、これらの燃料でも可能であること、またメタンや水素と火炎形状が大きく異なり扁平なアサガオ状であり、外周近くで燃焼反応が強いことが明らかになった。そして、その領域で火炎面が下流に向かって凸であり、負の火炎伸長を受けていることから、拡散熱的不均衡が生じて火炎が強化されている可能性が高いことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

希薄予混合燃焼は内燃機関の熱効率の向上および窒素酸化物の低減に有効である。しかし予混合火炎には希薄可燃限界が厳然と存在し、それ以下の当量比では通常の方法では全く燃焼せず、また可燃範囲内であってもこの限界に近い条件では消炎が頻発して実機の作動に適さない。本研究の方法で安定な超希薄燃焼が可能になれば、超希薄でなくとも、少なくとも可燃限界に近い希薄条件での作動が現実的になる。本研究の旋回流バーナがそのまま実機に利用できるか否かは明確でないが、分子量が比較的大きな燃料においては火炎の外周部で拡散熱的不均衡により火炎が強化されるという知見は、実機の開発に重要なヒントを与えられよう。

研究成果の概要(英文)：In a former study, it was found that ultra-lean combustion of methane-air and hydrogen air can be realized by using a swirl burner that forms a flame with a large recirculation zone of burned gas. In this study, it was investigated whether ultra-lean combustion is possible or not for propane, n-butane, and n-heptane. As a result, it was found that these fuels can be burned as premixed flames under respective ultra-lean conditions, and that their flame surface shapes are rather flat and like morning glory flowers whose peripheries are accompanied with strong combustion reactions. In this region, each flame surface is concave to the downstream, which enhances the flame surface by the mechanism of thermal-diffusive imbalance for a negatively stretched flame.

研究分野：Combustion

キーワード：超希薄燃焼 予混合燃焼 旋回火炎 再循環領域 炭化水素燃料 拡散熱的不均衡 アサガオ状火炎

1. 研究開始当初の背景

希薄予混合燃焼は NO_x 低減および熱効率向上の効果があるため、燃焼研究分野における長年の重要課題である。希薄予混合燃焼においては「希薄可燃限界」が厳然と存在し、それに近づくと消炎の発生確率が急激に高まるため、その限界にあまり近い条件で実機を作動させることは危険である。そこで、もし燃焼方法を工夫して希薄限界自体を更に希薄側にシフトさせることができれば、実機の作動範囲も希薄側に拡大して希薄燃焼の利点を十分に享受することができる。ここで、希薄可燃限界というのは一般には一次元的な火炎の伝播限界として定義されるが、一次元的でない火炎の場合も、通常その限界より希薄な条件では燃焼することができない。しかし、予混合気の前熱やプラズマ照射など特殊な方法を用いて希薄可燃限界を超える「超希薄燃焼」が実現できる場合がある。旋回流を用いた燃焼はその一つであり、これまでも超希薄燃焼が実現できたという報告がいくつか存在する。しかしそれらの報告の中では、なぜ旋回流中の燃焼において超希薄燃焼が可能になったかという理論的説明はなされていない。そこで最近本報告者はそのメカニズムを解明するため、メタンを燃料として旋回流バーナを用いた燃焼実験と詳細化学反応数値計算による研究を行った。その結果、超希薄燃焼が実現できている際には旋回流により発生した再循環領域の中に火炎の先端が形成され、既燃ガスの逆流が火炎を背後から追い越す特殊な状況になっていることを突き止めた。

2. 研究の目的

本研究は、これまで対象としてきた水素や C1 のメタンに代わり、C3 のプロパン、C4 の正ブタン、および C7 の正ヘプタンの各種炭化水素を対象として、既燃ガスの逆流が形成される旋回流中において超希薄燃焼が実現可能かどうか、また可能ならばどのようなメカニズムによるかについて、実験と詳細反応数値計算の両者を駆使して調べるものである。なお当初は C10 の正デカンを対象として考えていたが、沸点温度が高すぎて火炎の安定性に問題が生じたため、それよりも多少沸点温度が低い正ヘプタンに変更した。正ブタンより炭素数が大きい燃料という意味では、2つの燃料に大きな違いはない。このような旋回流中の火炎に関しては、特にガスタービン燃焼器に関連してこれまでに多くの研究がなされているが、その大多数は実用燃焼器を模擬した乱れの強い火炎であり、本研究のようにほぼ定常な層流火炎を対象とした研究は少ない。また旋回流中の層流火炎を対象とした研究の中でも、実験と詳細反応数値計算を比較した研究はほとんどない。従って本研究の試みはオリジナリティが高い。

3. 研究の方法

(1) 実験方法

本研究ではこれまでの研究と基本的に同じ形状の円錐台型旋回流バーナを用いた。図 1 に正ヘプタンを対象とした場合の供給系、図 2, 3 に同じく正ヘプタンを対象としたバーナの概略を示す。なおプロパン・正ブタン用の供給系とバーナは水素[1]およびメタン[2]用とほぼ同じである。装置中央部に円筒状空洞の旋回流発生部が設けられており、空洞の壁面に沿って設けられた 2 つのスリットから円周の接線方向に予混合気が入流することで旋回流が発生する。旋回流発生装置はプロパン・正ブタン用はアクリル製、正ヘプタン用はアルミ製である。正ヘプタン用旋回流発生装置にはリボンヒータを巻き付けて予混合気が 130°C となるように加熱し、予混合気温度は旋回流発生装置に挿入した熱電対で確認した。

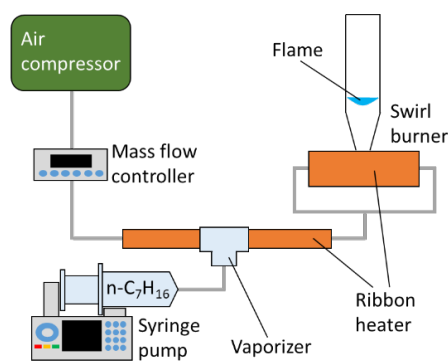


図 1 正ヘプタン用旋回バーナの供給系

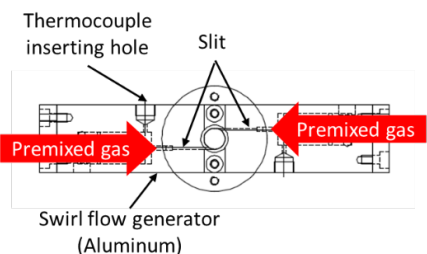


図 2 旋回バーナの概略図 (水平断面)

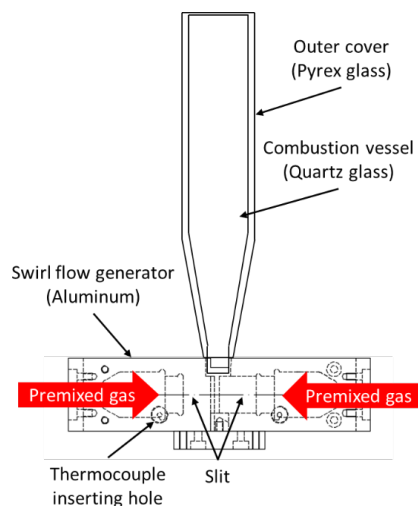


図 3 旋回バーナの概略図 (鉛直断面)

旋回の強さは無次元数であるスワール数 Sw で表され、本装置の場合はスリット長さ L_s に反比例する[1, 2]。旋回流発生部の内径は 10 mm, L_s は 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20mm の 4 種類である。 Sw はそれぞれ 7.07, 3.53, 2.36, 1.41 である。 燃焼容器は石英ガラス製で、円錐状の拡大部を持つ円筒形であり、上流側（燃焼容器下部）の直管部を旋回流発生装置に差し込む。 上流側は内径 10 mm, 直管部の長さが 15 mm であり、下流側は内径 30 mm, 直管部の長さが 120 mm である。 拡大部は広がり角が 10° , 長さが 62.3 mm である。 また燃焼容器の石英ガラス管の外側での対流熱伝達による熱損失を低減するため、燃焼容器にパイレックスガラス製のカバーを被せてある。 このカバーは上流側が内径 12.5 mm, 下流側が内径 36 mm で、燃焼容器同様に広がり角 10° の拡大部を有する。 カバーの上下端と燃焼容器との間に生じる隙間はシールテープで塞いでいる。

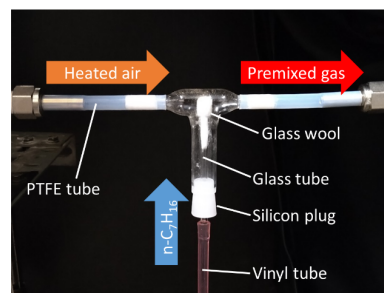


図4 気化器の概略

図4に正ヘプタン用の気化器の写真を示す。気化器はパイレックスガラス製のT字型配管で構成されており、下側から液体の正ヘプタン、左側から加熱空気が供給され、合流部で予混合気形成され右側から排出される。下側の配管にはガラス管を貫通させたシリコン栓が圧入されており、ガラス管はシリンジとビニルチューブで接続されている。シリンジから押し出された正ヘプタンはビニルチューブを通りガラス管に流入する。ガラス管先端にはガラスウールが挿入されており、ここに正ヘプタンが染み込むことで加熱空気と触れる面積が増加し、効率的かつ均一に気化させることができる。

(2) 計算方法

本研究では旋回流バーナを軸対称二次元モデルで模擬し、計算領域と境界条件を図5のように設定した。流入部境界での予混合気温度 T_0 は 300 K とし、雰囲気圧力は 1 atm とした。また、石英ガラス管と真鍮製の円錐台型フローガイドの内部の温度分布も熱伝導方程式を解いて導出した。実際の現象ではガラス管の外側に自然対流熱伝達が存在するが、その影響は小さく無視できると仮定し、ガラス管の外側を断熱条件とした。流入部境界での予混合気の r 方向流速 $-V$, 周方向流速 W と実験における流量との対応は文献[1, 2]と同じである。放射モデルとしては、放射再吸収を考慮しないモデルである Barlow らの Optically thin model [3] を適用した。正ブタン火炎の計算には、NUI Galway の 230 成分のブタン詳細反応機構をもとにして、本研究グループで提唱している Transport and heat release DRG method (TH-DRG) を用いて作成した 74 成分骨格機構を用いた。この骨格機構は、層流燃焼速度を詳細反応機構の結果に対して約 0.15% の誤差で計算することができる[4]。

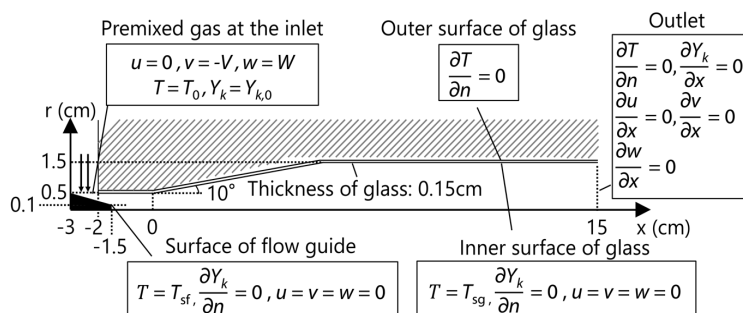


図5 計算領域と境界条件

4. 研究成果

(1) 火炎形状

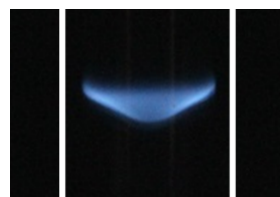
図6(a), (b)にそれぞれ代表的なメタン火炎および正ヘプタン火炎の写真を示す。燃焼容器内壁表面を白線で表現している。なおプロパンや正ブタンの火炎も(b)とほぼ同様の形状である。これらの燃料では、(a)のような細長い逆円錐状のメタン火炎と大きく異なり扁平なアサガオ状の火炎が形成され、外周近くにおける火炎面は下流に向かってやや凸であることがわかる。

(2) 消炎限界

図7~9にそれぞれプロパン、正ブタン、正ヘプタン火炎における総流量（横軸）と希薄消炎限界当量比（縦軸）の関係を示す。なお各燃料において3つのスワール数条件の結果を選んで示している。図7, 8ではカバーガラス有りの場合（赤）と無しの場合（青）の両方の結果を、図9ではカバーガラス有りの結果のみを示しており、また1つの空気流量条件において3回の測定を平均値をプロットしている。また図9においてはグラフのマーカーを消炎のパターンによって使い分けており、火炎が燃焼容器内で消炎した場合を●、火炎が下流に流されながら燃焼容器内で消炎した場合を▲、火炎が燃焼容器の下流端に達し、燃焼容器の外へ吹き



(a)



(b)

図6 代表的な火炎形状：
(a)メタン火炎, (b)正ヘプタン火炎

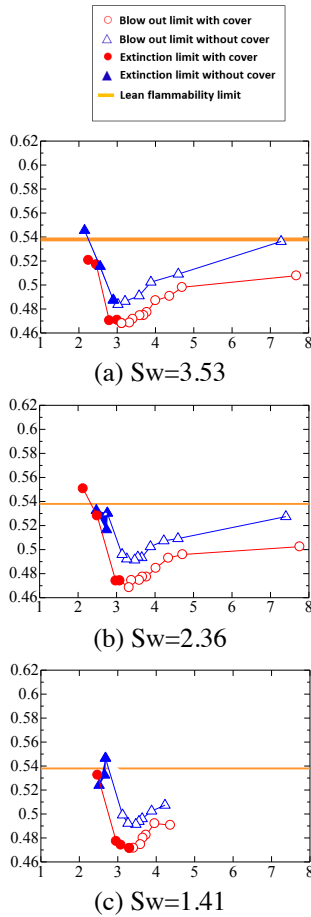


図7 プロパン火炎の希薄消炎限界

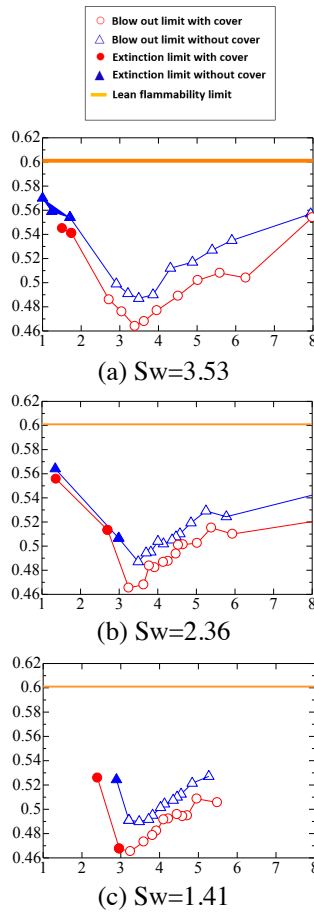


図8 正ブタン火炎の希薄消炎限界

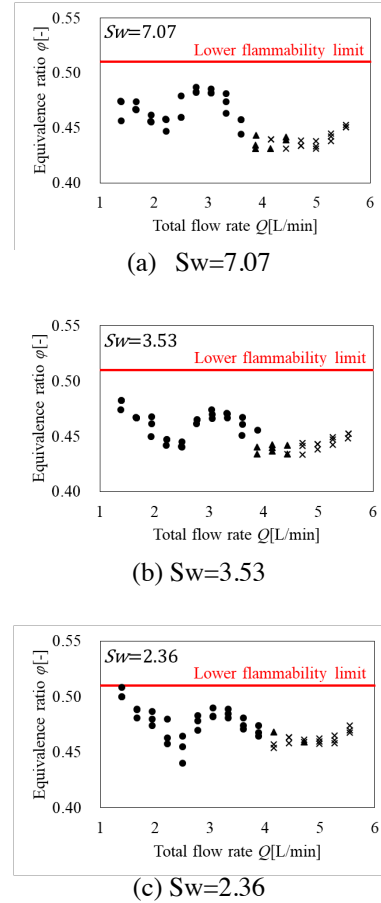


図9 正ヘプタン火炎の希薄消炎限界

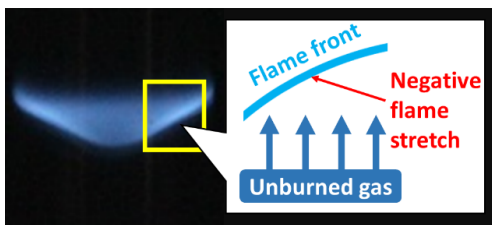


図10 負の伸長を受ける火炎におけるルイス数効果による火炎強化

飛ぶようにして消炎した場合を×で表現している。図中の橙色の横線は希薄可燃限界を示しているが、予混合気を予熱している正ヘプタン火炎の場合は Zabetakis の式[5]を用いて推定した値である。図7~9より、いずれの火炎におけるいずれのスワール数においても希薄可燃限界を十分に下回る超希薄燃焼が実現できていることが分かる。プロパンと正ブタンの場合は空気流量の増加に従って消炎限界は希薄側に移動し、一旦最希薄な値を取った後に過濃側に戻るといふ、メタン[2]や水素[1]の場合と同様な傾向を示している。どちらの火炎もカバーガラス有りの方が大幅に希薄な

燃焼を実現できており、内側の石英ガラス管から外側への対流熱伝達が火炎を弱化する効果が大きいことを示している。正ヘプタン火炎の場合、比較的低い総流量の場合はプロパンや正ブタンと同様な傾向を示すが、流量が大きくなると再び消炎限界は希薄側にシフトしピークを取る。この傾向はプロパンや正ブタンでは見られない。総流量が大きい領域では火炎が乱れる傾向が観察されており、乱流火炎化することが消炎限界に与える影響が燃料によって異なっている可能性がある。

(3) 火炎強化メカニズム

図10に示すように、アサガオ状火炎は外周に近い領域において上流の未燃混合気に向かって凹の形状であり、また数値計算結果から火炎面上流ではほぼ平行な流れが形成されていると推定されるため、負の火炎伸張を有すると考えられる。プロパン、正ブタン、正ヘプタンのいずれもルイス数が1よりかなり大きいため、後述するようにルイス数効果の一つである拡散熱的不均衡により火炎が強化されて超希薄燃焼が実現した可能性が高いと考えられる。

(4) 正ブタン火炎の数値計算結果

図11~13は当量比0.51、総流量3.1 L/min、スワール数 $Sw = 3.53$ における正ブタン空気旋回火炎の計算結果である。図11の速度分布より、中心軸付近に大きな逆流領域が形成されており、逆流領域内にも火炎が存在することが分かる。しかし火炎温度と熱発生率(HRR)の最大値は順流領域内の火炎面の曲率が大きい位置に存在している。火炎形状はアサガオ状であり、曲率はかなり異なるが、実験で観察された火炎形状と定性的には一致している。図12に火炎が下流に凸である領域の

熱流束分布を示すが、燃料拡散流束に燃焼熱をかけた化学エネルギー拡散流束より熱伝導熱流束の方が大きいことが分かる。この領域においては、図 11 に示すように流れは平行に近い一方で火炎が下流に凸であることから、火炎伸長が負である。従ってレイス数効果の一つである拡散熱的不均衡により火炎が強化されていると考えられる。図 13 は火炎温度と熱発生率がほぼ最大値を取る $r=0.8$ cm における火炎構造であり、比較のために同じ当量比における一次元予混合火炎の火炎構造を破線で併記している。旋回火炎、一次元火炎のどちらも当量比は 0.51 である。伸長のない一次元火炎に比べ、旋回火炎の温度と熱発生率が明らかに上昇していることが分かる。また生成物である H_2O と CO_2 の濃度が増加しており、このことから燃焼反応が強化されていることが分かる。

<引用文献>

1. A. Uemichi, et al., Formation of Ultra-Lean Comet-Like Flame in Swirling Hydrogen-Air Flow, *Combustion and Flame* 196, 314 (2018).
2. 蕨・他 4 名, 旋回流を用いたメタン-空気超希薄予混合燃焼のメカニズムの研究, 第 53 回燃焼シンポジウム講演論文集, 22 (2015).
3. R.S. Barlow, et al., Scalar Profiles and NO Formation in Laminar Opposed-Flow Partially Premixed Methane/Air Flames, *Combustion and Flame* 127, 2102 (2001).
4. K. Yamasaki, et al., Utilization of Transport of Species and Heat Release to a DRG-method-based Reduction, *Journal of Thermal Science and Technology* 13(2), JSTS0029 (2018).
5. M.G. Zabetakis, Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors, U. S. Bur. Mines, Bull. 627, 20 (1965).

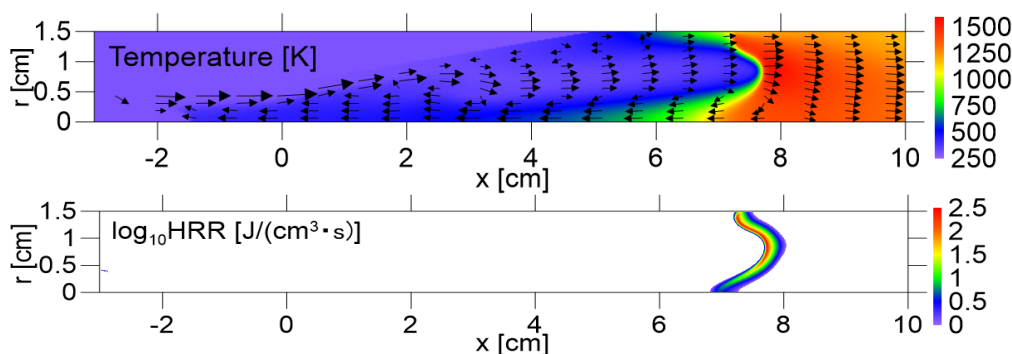


図 11 正ブタン旋回火炎の温度、流速、発熱速度(HRR)の分布： $\phi=0.51$, $Q=3.1$ L/min, $Sw=3.53$.

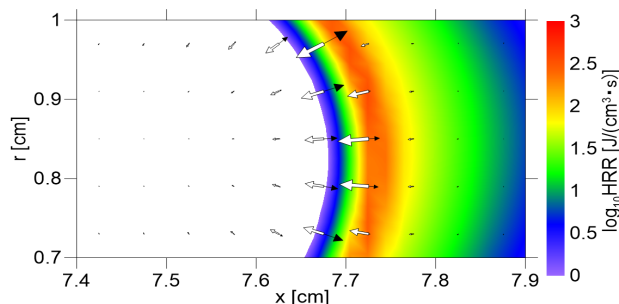


図 12 正ブタン旋回火炎の下流に凸な火炎面における化学エネルギー拡散流束（黒矢印）および熱伝導熱流束（白矢印）： $\phi=0.51$, $Q=3.1$ L/min, $Sw=3.53$.

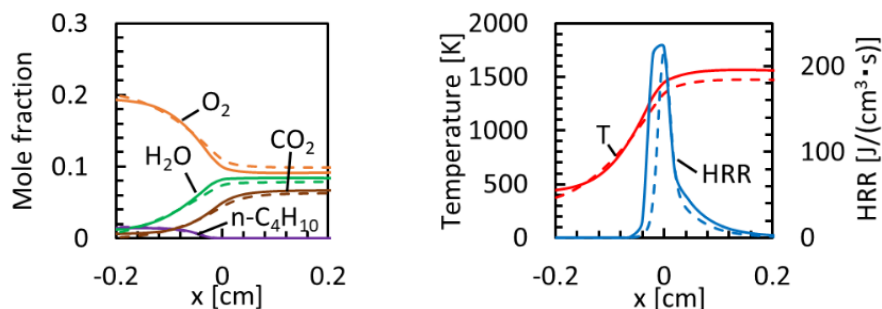


図 13 正ブタン旋回火炎の $r=0.8$ cm の位置における主要成分、温度、発熱速度の x 方向分布。 $\phi=0.51$, $Q=3.1$ L/min, $Sw=3.53$. 破線は同じ当量比の一次元予混合火炎における分布。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山崎浩一, 亀岡凜, 和田一輝, 入澤紀幸, 西岡牧人
2. 発表標題 旋回流バーナを用いたプロパン空気および正ブタン空気超希薄予混合火炎の研究
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎一彦, 足立和輝, 山崎浩一, 西岡牧人
2. 発表標題 旋回流を用いた超希薄炭化水素 / 空気予混合燃焼の数値解析
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀岡凜, 瀧田佳紀, 西岡牧人
2. 発表標題 ノルマルヘプタン空気超希薄旋回予混合火炎の研究
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 蔣宇洋, 陶金羽, 西岡牧人
2. 発表標題 メタン空気超希薄および超希釈旋回予混合火炎の火炎先端における火炎強化機構の研究
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------