

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560220

研究課題名(和文) 旋回よどみ流バーナによる超希薄燃焼の研究

研究課題名(英文) Study on ultra lean combustion using swirl stagnation flow burners

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) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：最近の研究で既燃ガスの逆流により超希薄燃焼が可能になることが確認されている。本研究では再循環流を形成して既燃ガスと未燃ガスの対向流を形成可能な旋回流バーナとして、ラッパ型、ホルダ付き円錐台型、急拡大型、ホルダ無し円錐台型の各バーナを製作し、超希薄予混合燃焼を試みた。その結果、ラッパ型以外のいずれの場合もメタンと水素の両方に対してほぼ定常な超希薄予混合燃焼を行うことに成功した。いずれの場合もスワール数が大きい方がより希薄な条件で燃焼する傾向を示した。また詳細反応数値計算により、水素空気火炎の場合はLewis数効果の一つである拡散熱的不均衡により火炎先端において非常に強い燃焼が生じることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In recent studies it was found that backflow of burned gas enables ultralean premixed combustion. In this study, we developed four swirl flow burners that can form a stable recirculation zone and a counterflow of burned gas and unburned gas, i.e., a bugle-shaped burner, a frustum-shaped burner with a flame holder, a sudden expansion burner, and a frustum-shaped burner without a holder, and tried to realize ultralean premixed combustion by using them. As a result, we succeeded in realizing almost steady ultralean combustion for both of methane-air and hydrogen-air in the three burner cases other than the bugle-shaped burner. It was found that in all the three cases larger Swirl number flow generally makes leaner combustion possible. Furthermore, a detailed-kinetics numerical simulation revealed that in a hydrogen-air flame there occurs a very strong combustion point at the leading edge of the flame due to so-called thermal-diffusive imbalance that is one of the Lewis number effects.

研究分野：燃焼学

キーワード：超希薄燃焼 予混合燃焼 旋回流 再循環領域 拡散熱的不均衡

1. 研究開始当初の背景

希薄燃焼はエネルギーの有効利用の観点から有用であると考えられており、その安定化技術の一つとして旋回流が挙げられる。しかし、旋回流と燃焼との相互作用については、十分な物理的解明がされておらず、燃焼メカニズムを更に明らかにする必要がある。研究代表者らはこれまでに回転対向流双子火炎モデルを適用した詳細反応数値計算による研究[1]において、火炎の構造を詳細に調べることで、旋回流によって既燃ガスの逆流領域が形成され、既燃ガスと未燃ガスの対向流が超希薄燃焼の安定化に大きく寄与していることを明らかにした。このモデルは、平行な上一対の無限に広い多孔質の軸対称噴射面から、予混合気を軸方向に噴出し、よどみ点流れの両面に双子火炎が形成されるものである。回転数を大きくすると逆流領域が生じる。しかし、回転対向流双子火炎は無限に広い噴射面という非現実的な仮定に基づいた理論的なモデルであり、実験で再現することは不可能である。そこで研究代表者等は実験において既燃ガスと未燃ガスの対向流が形成可能なラップ型旋回流モデルを考案し、詳細反応数値計算（輻射損失を考慮せず）においてメタン空気火炎の当量比  $\phi = 0.40$  まで燃焼させることに成功した[2]。

2. 研究の目的

本研究では既燃ガスと未燃ガスの対向流が形成可能な形状の旋回流バーナを考え、実際に製作し、超希薄燃焼が実現できるかどうかを調べることを第1の目的とした。また詳細反応数値計算によって火炎構造を詳しく調べ、回転対向流双子火炎と同様な現象が生じているかどうか調べることも目的とした。

3. 研究の方法

本研究では(i)ラップ型旋回流バーナ、(ii)ホルダ付き円錐台型旋回流バーナ、(iii)急拡大型旋回流バーナ、(iv)ホルダ無し円錐台型旋回流バーナの4種類のバーナを用いた。ここで「ホルダ」は火炎背後に設置する保炎器のことを表す。対象とした燃料はメタンと水素、酸化剤は空気であるが、(i)のバーナは水素空気火炎については実験を行っていない。また、これらのバーナは同時に並行して用いたのではなく、実験や詳細反応数値計算の結果を踏まえて(i)→(ii)→(iii)→(iv)の順に形状の改良を行ったものである。なお全てのバーナにおいて旋回流発生部の管の内径は 17 mm であり、スリットから予混合気が接線方向に噴射されるものである。スリットの本数はラップ型の場合は1本、他の場合は2本とした。

いずれのバーナの場合も事前に軸対称二次元の詳細反応数値計算を行い、計算上は既燃ガスの再循環領域が安定に形成され、超希薄燃焼が実現できるような形状と寸法を採用した。その際、上流の旋回流発生部は3次元形状であるため若干のモデル化を行う必要があった。即ち、

旋回流発生部の壁面から一様な半径方向流速  $V$  と一様な回転方向流速  $W$  で予混合気が噴射されるものとした。なお実験と比較する際には、 $V$  と  $W$  は旋回流発生部出口において軸方向全運動量と全角運動量の両者が等しくなるようにした。

図1に示すラップ型旋回流バーナは当初の詳細反応数値計算で  $\phi = 0.40$  のメタン空気超希薄火炎が得られた計算モデルと同じ形状とした

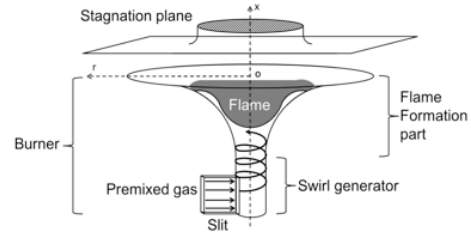


図1 ラップ型旋回流バーナ

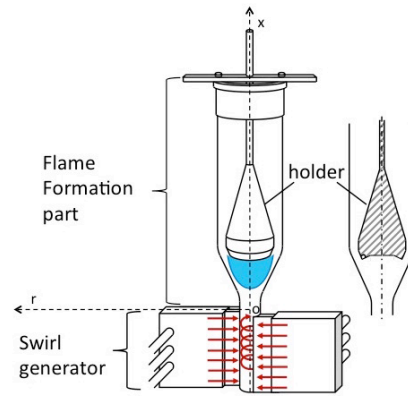


図2 ホルダ付き円錐台型旋回流バーナ

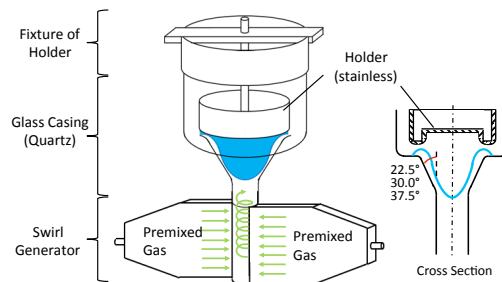


図3 急拡大型旋回流バーナ

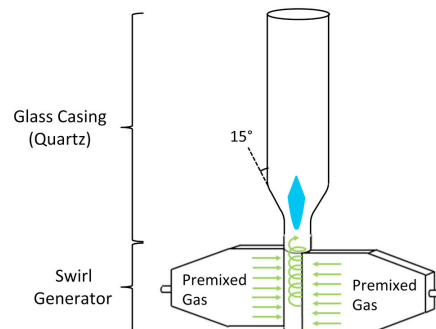


図4 ホルダ無し円錐台型旋回流バーナ

が、実際にメタンを燃料として実験を行うと、周囲のラッパ形状の石英ガラスや金属製よどみ板への熱損失が大きいため消炎する部分が発生して、軸対称性を得ることが困難であるとともに、またその消炎部分が対称軸周りに回転して定常性にも問題があった。

そこで熱損失を抑えるために図2に示すホルダ付き円錐台型巡回バーナを考案した。これは火炎と周囲の石英ガラスが接触する面積を減少させるとともに、下流において未燃ガスが再循環領域に混入して逆流するのをホルダによって抑えるようにしたものである。ホルダはステンレス製である。石英管の拡大部の角度は $30^\circ$ とした。このバーナにより、メタン空気火炎において最希薄消炎限界 $\phi = 0.465$ を達成した。これは一般に考えられている希薄可燃限界 $\phi = 0.50$ を十分下回るものである。ただしこのバーナの場合、ホルダの体積がかなり大きいことから、火炎やホルダの温度が完全に定常になるまでに非常に長い時間を要するという実験遂行上の問題があった。

続いて、ホルダ付き円錐台型より更に希薄な火炎を形成することを目指し、図3に示す急拡大型巡回バーナを考案した。これは既燃ガスの再循環流と未燃ガスを分離しやすいラッパ型バーナと熱損失が少ないホルダ付き円錐台型の折衷型であり、実験に先立つ詳細反応数値計算により有効性が確認されたものである。このバーナでは巡回流発生装置を製作し直し、スリット長さを20, 25, 30, 40, 50, 60 mmの6種類とした。なおスリットから長手方向に様な流速で噴射できるように整流部を設けた。それぞれのスリット長さに対するスワール数は2.50, 2.00, 1.67, 1.25, 1.00, 0.834である。また下流部の管の内径は60, 80, 100 mmとし、拡大部の角度は $22.5^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $37.5^\circ$ と変化した。

急拡大型巡回バーナを用いた実験において、下流部の管の内径が小さいほど最希薄消炎限界が低いという結果が得られた。これは、希薄可燃限界付近の燃焼においては火炎からの放射の影響が一般に支配的である他の研究結果に合致している。そこで、再循環領域を小さくする方がより超希薄燃焼に有効であるという予測を立て、最後に、図4に示すホルダ無し円錐台型巡回バーナを製作した。なおホルダ無しとしたのは、ホルダへの熱損失をなくすとともに、数値計算を行いやすくするためである。このバーナの下流部の管の内径は30 mmとし、拡大部の角度は $15^\circ$ とした。

#### 4. 研究成果

ここでは紙面の制限のため、急拡大型巡回バーナとホルダ無し円錐台型巡回バーナについてのみ結果を示す。

(1)急拡大型巡回バーナを用いたメタン空気火炎の結果：

図5にICCDカメラによる火炎の撮影画像を示す。バーナ拡大角 $30^\circ$ 、下流部の内径60 mm、

予混合気総流量 $Q = 6.4$  L/min、当量比0.50である。図のように軸対称で定常な火炎を形成できた。続いて図6に図5と同じバーナ拡大角と内径の場合の希薄消炎限界を示す。なおスワール数導出式を若干修正したため、図中のスワール数 $S_w$ の値0.946, 1.42, 1.89, 2.84はそれぞれ0.834, 1.25, 1.67, 2.50である。図に示すように $S_w = 2.50$ のとき、最希薄消炎限界 $\phi = 0.467$ を達成した。このように高いスワール数の場合に、図5に示すように火炎は巡回流発生部にかなり引き込まれている状態になっている。このような状態の場合により希薄条件下で燃焼する理由は現時点では解明できていない。なお、他の拡大角や内径の場合も基本的には同様な傾向を示すが、内径が大きくなるに従って最希薄消炎限界は高くなり、内径100 mm

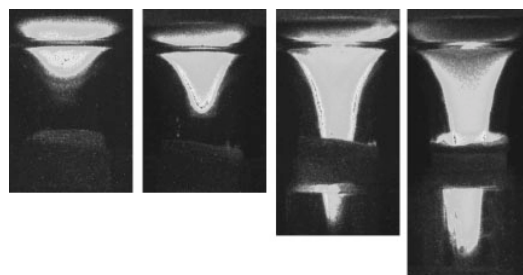


図5 ICCDカメラによる火炎の撮影画像：急拡大型バーナ，バーナ拡大角 $30^\circ$ ，下流部の内径60 mm。当量比 $\phi = 0.50$ 。スワール数は左から0.946, 1.42, 1.89, 2.84。

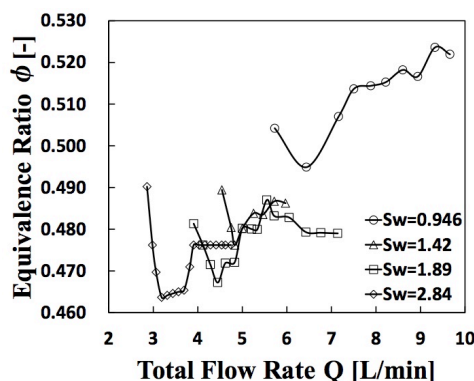


図6 メタン空気火炎の希薄消炎限界（急拡大型バーナ）：スワール数導出式を修正したため図中の $S_w$ の値0.946, 1.42, 1.89, 2.84はそれぞれ0.834, 1.25, 1.67, 2.50に変更。

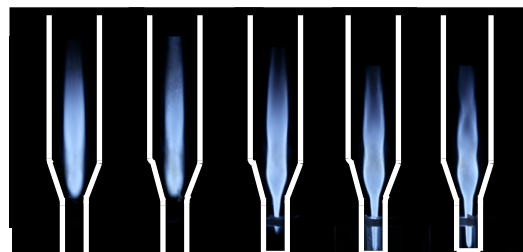


図7 メタン空気火炎の直接写真：ホルダ無し円錐台型バーナ，当量比 $\phi = 0.50$ 。スワール数は左から0.834, 1.00, 1.25, 1.67, 2.00。

の場合は  $\phi = 0.476$  であった。一方、拡大角の影響はほとんど見られなかった。この最希薄消炎限界の値  $\phi = 0.467$  は十分に希薄可燃限界を下回っているが、ホルダ付き円錐台型バーナの場合の  $\phi = 0.465$  とほぼ同じであり、バーナ形状を急拡大型に変更した効果は得られなかった。

(2)ホルダ無し円錐台型旋回バーナを用いたメタン空気火炎の結果：

図7に火炎の直接写真を示す。石英管の位置を白線で示している。予混合気総流量  $Q = 12.0$  L/min, 当量比  $\phi = 0.50$  である。図からわかるように、スワール数が上下するに従って火炎は旋回流発生部に引き込まれている。火炎は下流において発光が非常に薄くなるため、この写真から閉じているかどうかの判断はできない。また、火炎の外側を流れる未燃ガスは燃焼しないまま排出されている。

図8に希薄消炎限界を示す。スワール数が増加するほど低い最希薄消炎限界が得られ、ここで示す結果の中では  $S_w = 2.50$  において  $\phi = 0.464$  が得られた。ホルダが無い場合には下流において未燃ガスが再循環流中に混入して火炎温度を低下させ消炎を引き起こす可能性が高いが、それでもこのように前出の急拡大型バーナやホルダ付き円錐台型バーナとほぼ同じ最希薄消炎限界が得られたのは、下流の内径が 30 mm と小さく、再循環領域が小さく、輻射熱損失が大きく低下することが原因であると推察する。従って、ここで用いたバーナにホルダを設置した場合、更に低い最希薄消炎限界が得られる可能性がある。

(3)急拡大型旋回バーナを用いた水素空気火炎の結果：

図9にICCDカメラによる火炎の撮影画像を示す。バーナ拡大角  $30^\circ$ , 下流部の内径 60 mm, スワール数 2.50 である。図中の白線は旋回流発生部の円管および石英ガラスのアウトラインを示す。図より火炎の先端が非常に強く発光していることがわかる。左右いずれの図の場合もメタン空気火炎の場合のようにホルダを包み込むような形状でなく、先端の強力な発光の点から下流に箒状の尾が伸びたような火炎形状をしている。右図の場合は尾が若干長く、ホルダ近傍まで到達しているが、左図の場合はホルダに近い領域では消炎していることがわかる。この実験において、希薄可燃限界付近の条件で得られた火炎形状は基本的に図9を同様なものであった。

図10に希薄消炎限界を示す。図より、メタン空気火炎の場合と同様にスワール数が増加するほど低い最希薄消炎限界が得られ、 $S_w = 2.50$  において最希薄消炎限界  $\phi = 0.080$  が得られた。これは一般に知られている希薄可燃限界  $\phi = 0.10$  に比べて十分に低い値であるが、ホルダ付き円錐台型バーナにおいて得られた値  $\phi = 0.081$  とほぼ同じ値である。

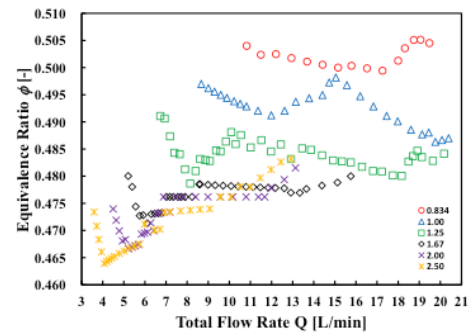


図8 メタン空気火炎の希薄消炎限界：ホルダ無し円錐台型バーナ,  $S_w = 0.834, 1.00, 1.25, 1.67, 2.00, 2.50$ .

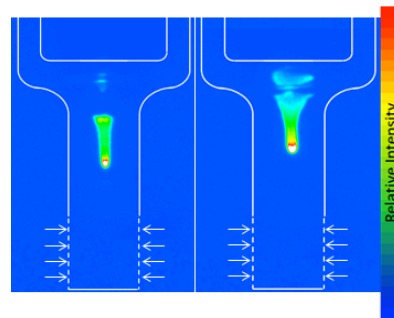


図9 ICCDカメラによる水素空気火炎の撮影画像：急拡大型バーナ，バーナ拡大角  $30^\circ$ ，下流部の内径 60 mm,  $S_w = 2.50$ . (左)  $Q = 3.5$  L/min,  $\phi = 0.10$ , (右)  $Q = 3.0$  L/min,  $\phi = 0.12$ , 当量比  $\phi = 0.50$ .

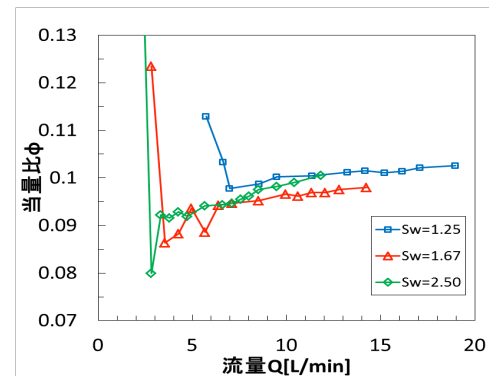


図10 水素空気火炎の希薄消炎限界：急拡大型バーナ，バーナ拡大角  $30^\circ$ ，下流部の内径 60 mm.

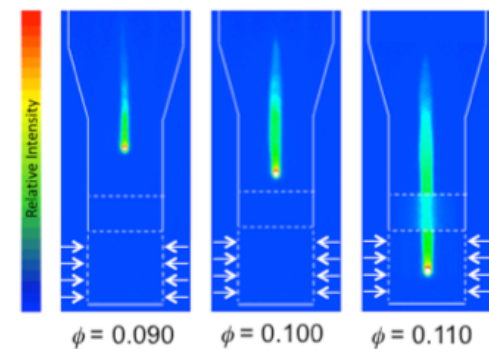


図11 ICCDカメラによる水素空気火炎の撮影画像：ホルダ無し円錐台型バーナ,  $S_w = 2.50, Q = 3.5$  L/min



(4)ホルダ無し円錐台型旋回バーナを用いた水素空気火炎の結果：

水素空気火炎の場合もメタン空気火炎の場合と同様にホルダ無し円錐台型バーナを用いて実験を行った。図 11 に ICCD カメラによる火炎の撮影画像を示す。火炎先端において非常に強く発光する点が存在し、そこから下流に箒状の尾が伸びた火炎形状は急拡大型の場合と同様であるが、更に尾が長く伸びたような形状をしている。

図 12 に希薄消炎限界を示す。これまで示した全ての場合と同様に、 $S_w = 2.50$  において最希薄消炎限界が得られた。その値は  $\phi = 0.085$  であり、急拡大型バーナの場合に比べて若干悪化したものの、基本的な傾向はほとんど変わらない。

図 13 にホルダ無し円錐台型バーナを用いた水素空気火炎に対する詳細反応数値計算結果を示す。なお、 $H_2O$  からの輻射熱損失を Optically-Thin のモデルで考慮している。条件は当量比  $\phi = 0.90$ 、総流量  $Q = 3.5$  L/min、 $S_w = 2.50$  である。図より、火炎先端の位置は若干異なるものの、OH 分布と火炎撮影画像との間に良好な一致が見られる。ここで火炎の最高温度は 1245.0 K であり、この当量比における断熱火炎温度 599.9 K よりも大幅に高い。

図 14 に火炎先端部における水素の拡散による化学エンタルピーおよび熱伝導による熱の流束分布を示す。化学エンタルピー流束は、水素の質量流束に燃焼熱をかけたものである。図より水素分子の高い拡散性のため、化学エンタルピーの流入が熱エンタルピーの流出を大きく上回っていることがわかる。即ち、本研究で形成することができた旋回流中の超希薄水素火炎においては、ルイス数効果の一つである拡散熱的不均衡が生じていることがいえる。

(5)まとめ：

ホルダ付き円錐台型旋回バーナ、急拡大型旋回バーナ、ホルダ無し円錐台型バーナのいずれの場合も、メタン空気火炎と水素空気火炎の両方に対して、超希薄燃焼を行うことに成功した。メタン空気燃焼の場合は当量比  $\phi$

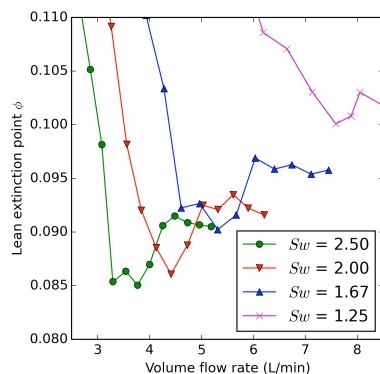


図 12 水素空気火炎の希薄消炎限界：ホルダ無し円錐台型バーナ。

$= 0.465$  付近、水素空気燃焼の場合は  $\phi = 0.080 \sim 0.085$  付近が、実現した最も希薄な燃焼条件である。いずれのバーナ、火炎の場合も、旋回流発生部が長手方向に短くスワール数が大きい方がより希薄な条件で燃焼する傾向を示した。また水素空気火炎の場合は拡散熱的不均衡により火炎先端の一点において非常に高温になり、強い燃焼が生じることがわかった。

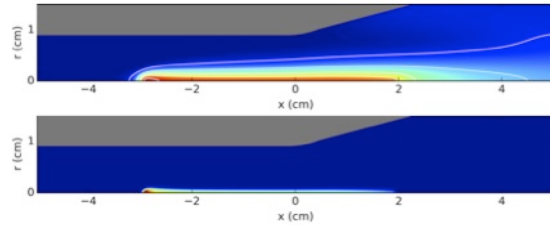


図 13 詳細反応数値計算による水素空気超希薄火炎の計算結果：(上) 温度分布、(下) OH 濃度分布。希薄消炎限界：ホルダ無し円錐台型バーナ。当量比  $\phi = 0.90$ 、 $Q = 3.5$  L/min、 $S_w = 2.50$ 。

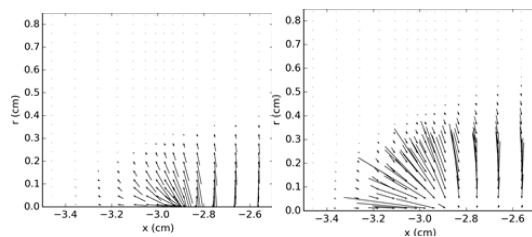


図 14 水素空気超希薄火炎の先端部における熱と化学エンタルピー流束：(左) 熱伝導による熱流束、(右) 水素の拡散による化学エンタルピーの流束。

<引用文献>

1. M. Nishioka, et al., "Ultra-Lean Combustion Mechanism by the Backflow of Burned Gas in Rotating Counterflow Twin Premixed Flames, Combust. Flame 158:2188 (2011).
2. A. Uemichi, et al., "Numerical Study on Ultra-Lean Combustion by Using Stagnation Flow Swirl Burner", Proceedings of 24<sup>th</sup> ICDERS, (2013)

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 8 件)

- ① A. Uemichi, K. Kouzaki, K. Warabi, K. Shimamura, M. Nishioka, Ultralean Hydrogen-Air Premixed Flame in Swirl Flow, 10<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion, 2015 年 7 月 19 日-7 月 22 日, Beijing (China)
- ② 上道茜, 香崎謙人, 藤一実, 嶋村耕平, 西岡牧人, 旋回流中に形成される超希薄水素火炎, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 2015 年 6 月 3 日-6 月 5 日, 福岡国際会議場 (福岡市)
- ③ 野尻一希, 西岡牧人, 希薄可燃限界に近い予混合気旋回流中の火炎電波に関する研究,

第 52 回燃焼シンポジウム, 2014 年 12 月 3 日-12 月 5 日, 岡山コンベンションセンター (岡山市)

④ 蕨一実, 香崎謙人, 橋本一輝, 上道茜, 嶋村耕平, 西岡牧人, 急拡大型旋回流バーナによる超希薄燃焼の研究, 第 52 回燃焼シンポジウム, 2014 年 12 月 3 日-12 月 5 日, 岡山コンベンションセンター (岡山市)

⑤ A. Uemichi, H. Aizawa, T. Hattori, M. Nishioka, Extension of the Leanest Extinction Limit and Formation of Ultralean Flame of Methane and Hydrogen by Swirling Flow, 35<sup>th</sup> International Symposium on Combustion (Work-in-Progress Poster), 2014 年 8 月 3 日-8 月 8 日, San Francisco (USA)

⑥ 相澤宏紀, 上道茜, 西岡牧人, 旋回流を用いたメタン-空気超希薄予混合燃焼の研究, 第 51 回燃焼シンポジウム, 2013 年 12 月 4 日-12 月 6 日, 大田区産業プラザ PiO (大田区)

⑦ 服部巧, 上道茜, 田中裕梨, 西岡牧人, 旋回流を用いた超希薄条件における水素-空気予混合燃焼の研究, 第 51 回燃焼シンポジウム, 2013 年 12 月 4 日-12 月 6 日, 大田区産業プラザ PiO (大田区)

⑧ 相澤宏紀, 上道茜, 西岡牧人, 旋回流を用いた超希薄予混合燃焼の研究 (第 3 報) -よどみ流型旋回バーナを用いた研究-, 第 50 回燃焼シンポジウム, 2012 年 12 月 5 日-12 月 7 日, 愛知県産業労働センターウィングあいち (名古屋)

## 6. 研究組織

### (1) 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 : 7 0 2 0 8 1 4 8