

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360100

研究課題名(和文) 管内旋回流を伴う希薄予混合火炎の時系列レーザ画像計測法の開発と火炎伝播特性の解明

研究課題名(英文) Development of Time-series Laser Imaging Techniques of Lean Premixed Flame in a Cylindrical Tube with Swirling Flow and Investigation of Flame Propagation Characteristics

研究代表者

小宮山 正治 (Komiya, Masaharu)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40178372

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円、(間接経費) 3,690,000円

研究成果の概要(和文)：円管内希薄予混合火炎の動的挙動と流れ場を同時に計測可能とし、この測定方法を用いて旋回流を伴う希薄予混合火炎の非定常挙動と流れ場の関連性を解析した。ここでは、2種類の予混合旋回羽根を用いて、異なる火炎の伝播挙動を考察した。中央が閉じた旋回羽根を用いた場合には旋回流を伴う火炎の先端部は高い歪みを受けるために火炎の消滅が生じて、中心部が逆流であるにもかかわらず、上流への伝播を抑制されている。一方、中央が空いている旋回羽根を用いた場合には中央からの噴流によって誘引される軸流によって火炎は下流に押し戻される挙動を示すことが分かった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed simultaneous visualizing techniques of lean premixed flame and flow fields in a cylinder glass by high-speed PIV measurement. We present characteristics of flame propagation in a premixed burner with swirling flow in order to investigate unsteady flame behavior in the premixer. Two kinds of mixture gas supply techniques were used in order to investigate the characteristics of flame propagation. In the premixer of the closed center swirler with swirling flow, the tip of the flame was highly stretched and received flame extinction and the flame propagation further upward was prevented. In the premixer of the open center swirler, it was confirmed that flame was pressed back to downstream of the premixer by the axial high velocity region generated by impingement flow from center hole of the swirler.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：予混合火炎 旋回流 円管内 PIV 火炎伝播

1. 研究開始当初の背景

現在、環境適合・窒素酸化物低減の観点から希薄予混合火炎が工業用燃焼器に利用される場合が増加している。しかし、逆火の危険性から旋回羽根後流で燃料と空気を急速に混合する必要があり、混合状態が不完全な予混合状態で火炎を形成することになる。このことは高温領域の発生を促進し、窒素酸化物 (NO_x) 排出を増加することになる。このため、逆火の危険性を抑制させて均質な混合状態を促進し、安定した火炎状態を維持するための燃焼法を確立することが急務となっている。工業用燃焼器は管壁で覆われており、旋回流をとまなう流れによる渦崩壊や渦心の歳差運動による火炎の非定常挙動が複雑となる。そこで、乱流予混合火炎の詳細な構造解析が必要であり、レーザ応用による複合画像計測が有用となる。これらの計測技術を応用して、管内旋回流をとまなう燃焼場における火炎の動的挙動の可視化を可能として、その非定常伝播特性を解析することが燃焼現象の理解および安定燃焼法の確立には重要であると考えられる。これまで乱流燃焼場の詳細分析のためにレーザ画像計測が利用され、2次元分布計測による報告例がある。この場合に流体速度計測は大气開放中における燃焼場での粒子画像流速測定法によるものが多く、工業燃焼器で重要と考えられる円管内旋回流れがともなう燃焼場での計測はほとんど報告例がみられない。これは火炎の非定常挙動を計測するには円管表面からの散乱の影響および円管での像の湾曲のために鮮明な粒子画像の計測が困難となるためである。

2. 研究の目的

工業用に利用される場合が増加している希薄予混合燃焼器における予混合火炎は、一般に伝播性を持つために、その条件によっては逆火による燃焼器の損傷の危険性が生じ、安定した火炎状態を維持する燃焼法を確立することが重要となる。また、燃焼器管内では火炎安定化と空気・燃料流の混合促進のために旋回流をとまなう。このことから、旋回流による渦崩壊や歳差運動が生じ、不安定な伝播挙動が火炎構造をより複雑にする。このため、円管内旋回流下での予混合火炎の動的挙動を時系列レーザ応用画像計測から直接測定することを可能とし、この方法を実際に希薄予混合火炎の動的挙動解析に適用する。さらにレーザ散乱法を用いて瞬時2次元温度分布計測を行い、希薄予混合火炎の伝播特性を解析することを目的とする。

3. 研究の方法

本実験では、図1に示す予混合燃焼器を模擬した実験装置を使用した。この実験用燃焼器では燃焼室を模擬するために長さ350mmの石英ガラス製の円筒を用いている。燃料は周囲空気流に中心ノズルからスワロー上流部で噴出される。この燃料ノズルは1mm径の合計24個の穴で作られている。スワロー

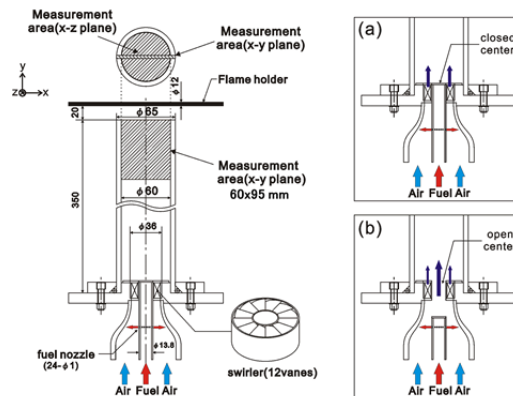


図1 希薄予混合燃焼器概略図。

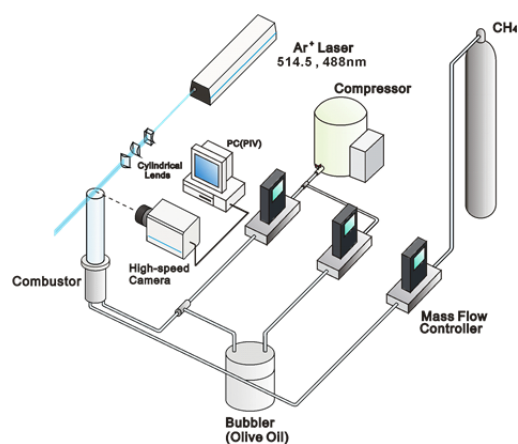


図2 実験光学系概略図

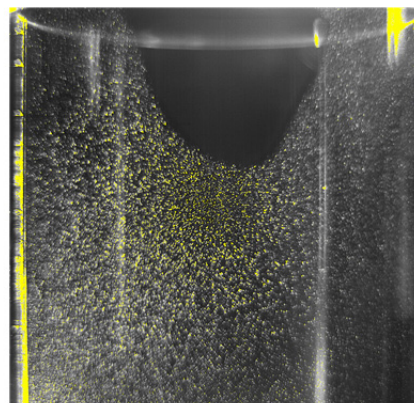


図3 Ar⁺レーザによる円筒ガラス管内を伝播する希薄予混合火炎とトレーサ粒子画像

手前で混合された空気・メタン (CH₄) 混合気体はスワローの旋回羽根 (出口角度 $\alpha = 45^\circ$) により旋回を与えられ、燃焼室を模擬した内径60mm、長さ350mmの石英ガラス製円筒に流入する。燃焼器出口下流20mmには直径12mmの円柱を保炎器として配置しており、これにより火炎を保炎させる。また本研究では燃焼器内部の流れ場を意図的に変化させ、逆火特性に及ぼす影響を検証するため

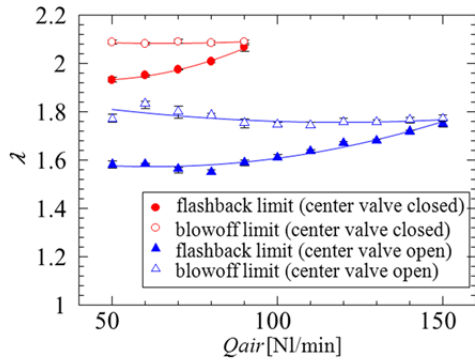


図4 2種類のスワラを用いた燃焼器における逆火および吹き飛び限界

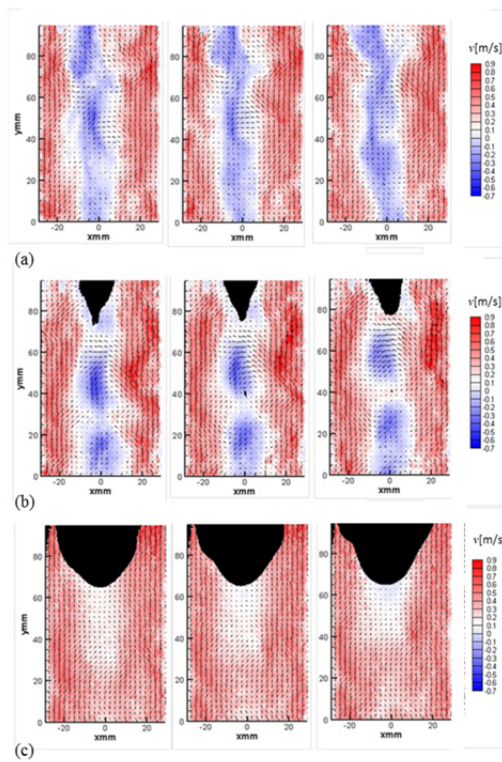
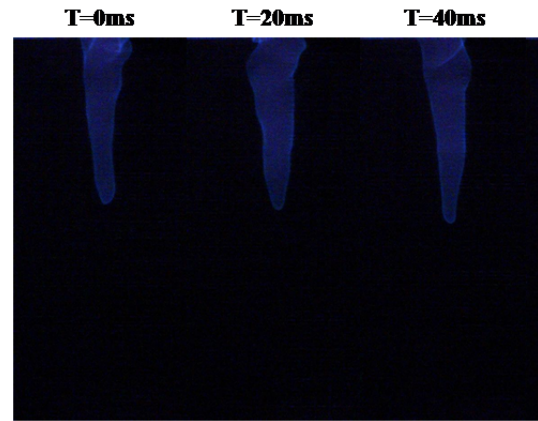
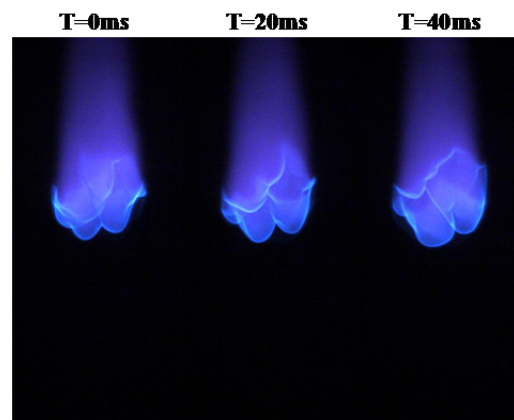


図5 時系列PIVによるx-y断面の速度分布の測定結果. 空気流量 $Q_{air} = 50$ NL/min, スワラ角度 $\alpha = 45^\circ$. (a) 中心閉鎖型スワラでの未燃焼条件. (b) 中心閉鎖型スワラでの燃焼条件. (c) 中心開放型スワラでの燃焼条件.

に, 図1中(a), (b)に示す2種類のスワラを使用して実験を行った. (a)ではスワラ中心は閉鎖され, 混合気体は全て旋回羽根を通過し燃焼器内に旋回流のみを形成する. (b)ではスワラ中心が開放されており, 混合気体の一部が燃焼器内に旋回のかかっていない軸方向噴流を形成する. スワール数は条件(a)の場合には0.737, 条件(b)の場合には空気流量が50 NL/minの場合に0.472になる.



(a) 中心閉鎖型スワラ, 空気流量 $Q_{air} = 50$ NL/min.



(b) 中心開放型スワラ, 空気流量 $Q_{air} = 50$ NL/min.

図6 高感度高速度カラーカメラを用いた時系列火炎自発光画像.

本実験では図1(a), (b)に示す2種類のスワラを用いた燃焼器構造における逆火特性を解明するために, 逆火・吹き消え限界の計測を行った. 逆火限界計測では空気流量を $Q_{air} = 50$ NL/min から150NL/minの10NL/min間隔で増加させ計測を行った. 本研究では, 空気流量一定のもと火炎を保炎器に保炎させた状態で, 燃料の流量を増加させていき, 火炎が保炎器から離れてスワラ出口から100mm下流の位置まで伝播した場合を逆火と定義した. また計測は各空気流量条件において5回行い, その平均をその条件における逆火(吹き消え)限界とした.

本実験では逆火限界条件付近における燃焼器内部の火炎挙動と, その周囲の未燃予混合ガスの流れ場との相互干渉の様子を連続的に可視化するために, 時系列粒子画像流速測定法(時系列PIV計測)を導入した(図2). 今回実施した時系列PIV計測は, 図1の斜線部分で示した計測領域にて行った. 図に示すようにx軸は中心からの半径方向を, y軸は

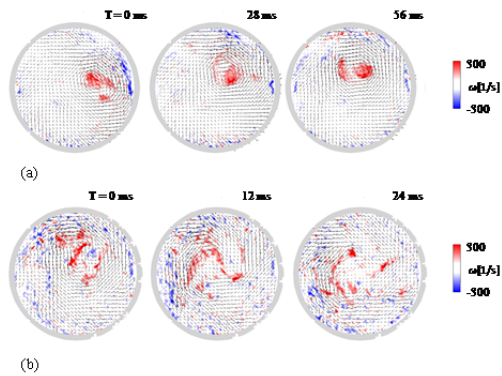


図7 x-z断面での時系列PIVによる速度分布の測定結果. 中心閉鎖型スワラ, 未燃焼条件. (a) 空気流量 $Q_{air} = 50$ NL/min, スワラ角度 $\alpha = 45^\circ$. (b) 空気流量 $Q_{air} = 100$ NL/min, スワラ角度 α

円管ガラスの下流方向を, z 軸は面外方向をそれぞれ表す. 連続発振の Ar^+ レーザを厚さ約 1mm のシート状に照射し, 流れ場にトレーサ粒子として混入したオリーブオイルミストがレーザシート面通過時に発する散乱光を, 高速度カメラを用いて毎秒 2000 コマで連続的に撮影した. 散乱粒子強度画像を計測する場合には前方散乱を利用して円管表面からの反射を抑えて鮮明な粒子画像を測定できる計測系を構築した. 撮影された画像に回帰的相関処理を行うことで2次元面内の速度情報を取得している.

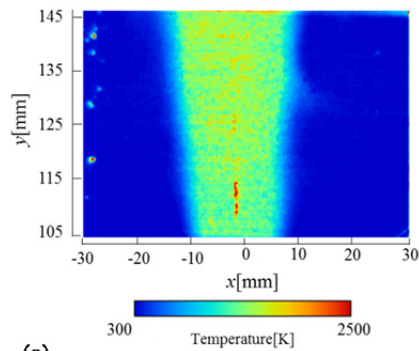
レーザ散乱による2次元温度計測を行う場合には供給するオリーブオイルを混入せずに燃料と空気を混合させた. 計測条件での未燃焼ガスと既燃焼ガスのレーザ散乱の有効散乱断面積の変化は3%以下である. 波長 532 nm, パルス出力 300mJ の Nd:YAG レーザを測定領域に導入し, 測定領域の直角方向に設置したイメージ・インテンシファイア付きの CCD カメラを用いて瞬時2次元温度分布計測を行った. 測定領域はガラス円管下流出口から下流側に 10 mm ($y = 105$ mm) から 50 mm ($y = 145$ mm) の x - y 断面に設定した.

4. 研究成果

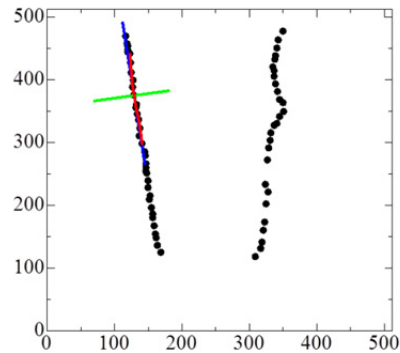
(1) 図3に円管内旋回流中を伝播する希薄予混合火炎の形状と流動を計測するために Ar^+ レーザを導入した場合のトレーサ粒子散乱強度画像を示す. これは前方散乱を利用して円管表面からの反射を抑えて鮮明な粒子画像を計測し, それに基づいたPIV計測を可能とした. (2) 図4に, 中心閉鎖型スワラと中心開放型スワラの2種類の燃焼器における逆火限界・吹き消え限界の測定結果を示す. ある空気流量条件において, 逆火限界を示す点より低い空気比 λ で火炎は逆火し, 吹き消え限界を示す点より高い空気比では火炎は吹き消える. 図4で逆火限界と吹き消え限界に挟

まれる領域が火炎安定領域を示す. この測定結果より, 中心開放型スワラは中心閉鎖型スワラに比べ逆火限界の空気比が低く, 逆火が生じにくいこと, さらに火炎安定領域も広いことが分かる.

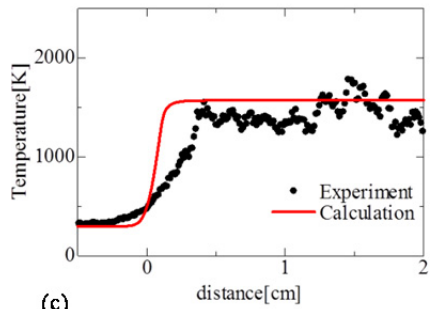
(3) 両方のスワラ条件で生じた逆火および火炎安定性の違いについて, x - y 断面の時系列PIV計測の結果を比較して示す. 図5(a)(b)は中心閉鎖型のスワラを使用した場合の計測領域における燃焼場の瞬時流速分布の測定結果を示したものである. 図中のベクトルは計測領域内の速度成分を表しており, y 軸方向速度の分布を疑似カラーで表示している. 図5(a)は未燃焼状態での測定結果を示している. 中心軸に沿って, 逆流領域が常に存在していることが分かる. 一方, 図5(b)は燃焼状態での測定結果を示している. 図中の黒色部はトレーサ粒子の焼失領域から特定した高温領域を表している. 図より, 管中心軸上には旋回流による逆流領域(青色疑似カラーの領域)が存在していることがわかる. このとき火炎先端付近では流速勾配が非常に大きくなっている. そのため火炎は強い火炎伸長を受けており, 火炎先端部では火炎伸長率が增大して消炎作用が生じ, 火炎の上流伝播が抑制されていると考えられる. また, 逆流領域中には断続的に軸方向に正の流速を持つ領域が出現しており, この正の流速域によって逆流領域からの火炎の上流伝播が抑制される様子が確認された. これらの火炎伸長率増加による消炎作用, および断続的な正の流速域による上流への火炎伝播抑制作用を合わせた火炎伝播抑制と, 逆流領域を上流へ伝播する火炎との相互作用が, 中心閉鎖型の高旋回流れ場における火炎安定化メカニズムであると考えられる. ここから当量比を増加させていくと火炎温度が上昇するため, 火炎伸長率増大による消炎作用が弱まる. さらに火炎先端部での燃焼速度も増加するので, 旋回流渦心の逆流領域から上流への火炎伝播および逆火が発生すると考えられる. (3) 図5(c)に中心開放型スワラを使用した時の燃焼状態での時系列PIV計測の結果を示す. また, 図6(a), (b)には中心閉鎖型スワラと中心開放型スワラの2種類の燃焼器における火炎自発光をカラー高速度カメラを用いて計測した結果をそれぞれ示す. 図5(c)から, 火炎先端付近に低流速域が出現していることがわかる. これは非燃焼場では発生しない, 燃焼場特有の現象であり, 火炎面近傍で未燃ガスが熱膨張することに起因する. 火炎はこの低流速域から上流伝播しようとするが, スワラ中心部からの軸流噴流によって火炎面が押し潰されるので, 低流速域の発達が消えて逆火は抑制される. これは中心開放型スワラに独特の逆火抑制効果であると言える. また火炎安定状態から燃料を増加させると, 火炎温度は上昇するため火炎面近傍での熱膨張が激しくなり, 火炎面に凹凸が生じて図6(b)のようなセル状火炎に遷移する.



(a)

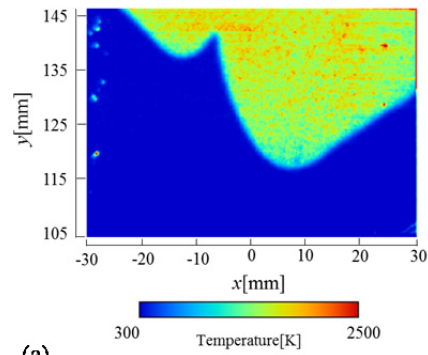


(b)

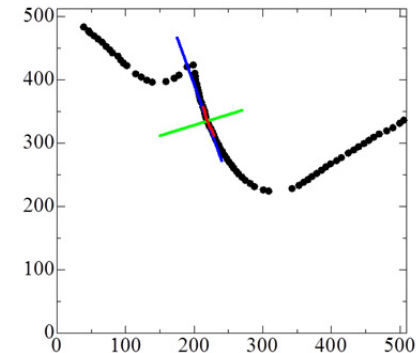


(c)

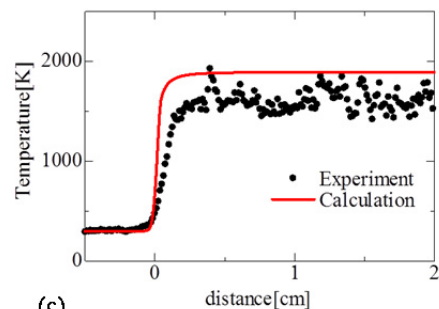
図8 瞬時2次元温度分布測定結果(中心閉鎖型スワロー). (a) 瞬時温度分布. (b) 火炎面に対する接線方向(青線)と法線方向(緑線) (c) 火炎面の法線方向に沿った温度分布.



(a)



(b)



(c)

図9 瞬時2次元温度分布測定結果(中心開放型スワロー). (a) 瞬時温度分布. (b) 火炎面に対する接線方向(青線)と法線方向(緑線) (c) 火炎面の法線方向に沿った温度分布.

セル状火炎では火炎面積が増大するので、当量比増加により火炎温度が増加している影響も合わせ、燃焼速度が増加する。増加した燃焼速度が未燃ガス流速を上回ることによって上流への火炎伝播が誘起され、逆火に至ると考えられる。なお、中心閉鎖型スワローの場合には、図6(a)からわかるように火炎形状は細長く、その火炎面は未燃ガス主流に対しておよそ平行な方向を向いている。よって、中心開放型スワローでの結果とは異なり、火炎面近傍における未燃ガスの熱膨張による効果をあまり受けない。

(4) 円管ガラス下流出口断面での x - z 面に対する連続 PIV 計測結果を示す。測定は中心閉鎖型スワローを用いた未燃焼ガスに対して行った。図7(a)は空気流量 $Q_{air} = 50$ NL/min,

図7(b)は $Q_{air} = 100$ NL/min の場合を示す。図中のベクトルは計測領域内の速度成分を表しており、測定面内の渦度分布を疑似カラーで表示している。旋回流の渦芯は定常的に中心に存在するのではなく、その位置が変動しながら、流れの回転方向に移動する。これは渦芯の歳差運動を示している。測定をした結果から、歳差運動の周期は図7(a)では 3.68 s^{-1} 、図7(b)では 7.35 s^{-1} であることが分かった。

(5) 図8(a)は中心閉鎖型スワローを用いた場合、図9(a)は中心開放型スワローを用いた場合のレーリ散乱による瞬時2次元温度分布をそれぞれ表す。火炎の形状は図6と比較すると、中心閉鎖型スワローの場合には先端が細い形状をしているが、火炎面境界の温度勾配は緩やかで火炎面厚さは大きく、反応が緩慢

であることが分かる。図 8(b)と図 9(b)には火炎面に対して、接線方向と法線方向をそれぞれ抽出した。これから求めた法線方向の温度分布と定常 1 次元予混合火炎の数値計算結果を図 8(c)と図 9(c)にそれぞれ示す。数値計算は 1 次元の自由伝播火炎の計算コード、PREMIX に基づいて算出する。その中で、熱物性値および素反応に関する諸量は GRI-MECH 3.0 を用いている。両方の図ともに数値計算による温度分布は実験結果よりも温度勾配が急峻になっているが、これはレーザー光の方向が火炎面の法線方向と一致していないためであると考えられる。図 9(c)の中心開放型スワローの場合は図 8(c)の中心閉鎖型スワローに比較して温度勾配が急峻である。これは中心開放型スワローを使用した場合にはより小さい空気比で逆火が生じるためであると考えられ、逆火限界条件における中心開放型スワローを用いた場合の予混合火炎の反応が閉鎖型スワローの場合に比較してより活発であることを示していると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

(1) Ichikawa, Y., Komiyama, M., and Koyama, A., Takeishi, K., “Study on Flow and Flame Propagation Behavior of Lean Premixed Burner with Swirling Flow”, Proceedings of 15th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, 査読有, (2014), CD-ROM No. TU207.

(2) Komiyama, M., Takeishi, K. and Ogawa, Y., “Flame Propagation Behavior of Lean Premixed Burners with Swirling Flow Measured by High-Speed PIV”, Proceedings of 8th European Combustion Meeting, 査読有, (2013), CD-ROM No. P1-65.

(3) Komiyama, M., Takeishi, K. and Ogawa, Y., “Experimental Investigation on Flashback Behavior of a Lean Premixed Burner with Swirling Flow”, Proceedings of 23rd International Symposium on Transport Phenomena, 査読有, (2012), CD-ROM No. 139.

(4) Komiyama, M., Takeishi, K. and Ogawa, Y., “Dynamic Flame Behavior in Lean Premixed Burner with Swirling Flow”, Proceedings of 7th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 査読有, (2012), CD-ROM No. J028.

(5) 小宮山正治, 武石賢一郎, 小川洋平, 岩崎悠志, “旋回流を伴う希薄予混合燃焼器における非定常火炎挙動”, 日本機械学会論文集 (B 編), 査読有, Vol. 78, No. 794, (2012), pp. 1832-1840.

(6) Ogawa, Y., Komiyama, M. and Takeishi, K., “An Experimental Study on the Flashback Phenomena of Premixed

Combustors Using Swirling Flow”, Proceedings of International Gas Turbine Congress 2011, 査読有, (2011), CD-ROM: IGTC2011-0209.

〔学会発表〕(計 3 件)

(1) 小山敦史, 小宮山正治, 市川雄一, “円管内における旋回流を伴う希薄予混合火炎の火炎挙動に関する研究”, 第 5 1 回燃焼シンポジウム, 2013. 12. 5, pp. 240-241, 東京.

(2) 小宮山正治, 武石賢一郎, 小川洋平, “レーザー画像計測に基づく旋回流希薄予混合火炎の伝播特性に関する研究”, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012. 9. 11, No. G080012, 金沢大学.

(3) 小川洋平, 小宮山正治, 武石賢一郎, “レーザー応用画像計測に基づく希薄予混合火炎の逆火現象に関する研究”, 第 4 9 回燃焼シンポジウム, 2011. 12. 5, pp. 86-87, 横浜.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小宮山 正治 (KOMIYAMA MASAHARU)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 40178372

(2) 研究分担者

武石 賢一郎 (TAKEISHI KENICHIRO)
大阪大学・基礎工学研究科・教授
研究者番号: 70379113

小田 豊 (ODA YUTAKA)
大阪大学・工学研究科・講師
研究者番号: 50403150