Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00236

Received date : 19 July, 2021

Accepted date : 15 September, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 30 September, 2021

旋回流を伴ったテーパ管内の火炎挙動

小宮山 正治^{*1}, 濱口 典大^{*2}, 西田 哲^{*2}

Flame behavior in tapered tubes with swirling flow

Masaharu KOMIYAMA^{*1}, Fumihiro HAMAGUCHI^{*2} and Satoshi NISHIDA^{*2}

^{*1,*2} Department of Mechanical Engineering, Gifu University
1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu 501-1193, Japan

Abstract

Lean premixed combustion is one of the most promising techniques to reduce nitrogen oxide (NO_x) emissions. However, lean premixed combustors have a narrow stable combustion range compared with diffusion combustors and have a risk of flashback. The combustor does not usually have a constant cross-sectional shape due to production restrictions. It is important to analyze the propagation behavior of the lean premixed flame in the swirl flow in the tapered glass tube where the cross-sectional shape changes and the acceleration or deceleration flow exists. In this study, we presented a visualization of the propagation behavior of lean premixed flame in two tapered tubes. One of the quartz glass tubes expanded toward the tube outlet (Tube A) and the other one narrowed toward the tube outlet (Tube B). The inclined angle of both tubes was 1.6°. We visualized the unburned flow and flame behaviors with swirl flow whose swirl vane angles were 15.0° and 22.5°. The reverse flows in the unburned condition were appeared along the center axis in tube A with 22.5° of vane angle. On the other hand, the reverse flows in the unburned condition did not appear in tube B with 22.5° of vane angle, and the flow was accelerated. The flame propagated along low-velocity flow caused in the center axis in tube A. The flashback in tube B with 22.5° of vane angle was occurred in an extremely lean condition as compared with 15.0° of vane angle. In tube B, a reverse flow field was not observed in the unburned conditions, but a reverse flow region occurred upstream of the flame tip in the swirling flow with 22.5° of vane angle.

Keywords : Lean premixed flame, Tapered tube, Swirl flow, Flame propagation, Reverse flow

1. 緒 言

環境負荷増加の要因である窒素酸化物(NO_x)排出量を抑制するため、ガス燃料(天然ガス)を用いた工業燃焼器で利用される方法で最も有望な手法は、希薄予混合燃焼の採用に基づくものである。予混合燃焼は、燃料と空気を混合した後、混合ガスを燃焼させる技術である。希薄予混合燃焼では、混合気の不均一に起因する局所的な高温域が抑制されるため、NO_x排出量の削減に大きな効果がある。しかし、予混合燃焼は、未燃焼混合ガス中の火炎上流へ伝ばする特性をもつ。このため、混合ガス領域へ火炎が伝ばすることは、上流に位置する燃焼機器を過熱して損傷することにつながる危険性が生じる。現在、燃料と空気の混合を促進し、再循環領域で火炎を保持し、よりコンパクトな燃焼器を開発するために、ガスタービン予混合燃焼器で旋回流を使用することは一般的な方法となっている。しかし、渦の崩壊や渦心の歳差運動(PVC)などの渦の不安定な挙動は、火炎構造を複雑にしている(Syred, 2006)。これまで、渦崩壊によって引き起こされる火炎伝ばは、実験的手法と数値解析の両方で多くの研究がなされており、Ishizuka (2002)は、実験、理論、数値シミュレーションの観点から、渦軸に沿った火炎伝ばの特性についてレビューを行っている。そのなかで、重要な特性の1つは管内の旋回流による火炎の伝ばが、

層流燃焼速度ではなく、最大接線方向速度によって支配されていることである。旋回流が火炎伝ばに大きな影響を与えていることを指摘している。旋回流をともなう燃焼器における逆火特性に関しては、高速度カメラとOH-LIFを用いた計測により分析が行われており (Fritz et al., 2001)、逆火限界と消炎係数の関係についての報告がある (Kröner et al., 2002)。Heegerら (2010) は火炎先端領域での流れ場の変化が、逆火と密接に関連していることを明らかにしている。また、渦心の歳差運動について、未燃焼の条件下での流れ場を測定し、その特性を明らかにした報告もある (Shtork et al., 2007)。実用的には、ガスタービン燃焼器を対象として、発生する渦崩壊について数値解析により分析を行っている報告がある (Turrell et al., 2004)。さらに、旋回流をともなう燃焼器での火炎と流れの挙動に関して、実験手法と数値解析を併用して解析されており (Thumuluru and Lieuwen, 2009, Stöhr et al., 2009, Johnson et al., 2005, Cheng et al., 2009)、音響的に強制された旋回流を伴う火炎の動的特性が、OH-LIF画像測によって分析され (Thumuluru and Lieuwe, 2009)、また渦の歳差運動サイクルに応じて、変化する流速分布とOH分布のパターンを明らかにしている (Stöhr et al., 2009)。燃焼器内の異なる旋回流の強さでの測定結果を比較して、流れ場および排出濃度の特性を分析している例もある (Johnson et al., 2005, Cheng et al., 2009)。しかし、火炎や渦との複雑な相互作用のため、旋回流を伴う管内での火炎伝ばの総括的なメカニズムはまだ十分には解明されていない。

これまで我々の研究では、予混合器内の火炎伝ばと流れ場の間の相互作用に焦点を当て、高速度カメラを使用した時系列PIV測定を行い、円管内での測定結果からは、火炎先端近傍には低速領域が存在し、火炎はその領域を通して上流方向へ伝ばすることを明らかにした (Ogawa et al., 2011)。そのことを応用して時間可変旋回羽根をもつ燃焼器を開発し、旋回羽根の角度を時間的に変化させ、それに伴い火炎先端部に生じる流れの方向と火炎の移動方向を上下方向に往復変化させることを可能とした (Ichikawa et al., 2015a, Komiyama et al., 2021)。これまで旋回流を伴う未燃ガス中を伝ばする火炎の非定常挙動は、主に一定断面をもつ円形管で詳細に分析されているが、実用燃焼器では構造上の制限により流れ方向に対して、断面形状が変化する燃焼部および混合部が存在する。断面形状が変化する場合には、内部流れに加速流または減速流が発生することになり、管内の火炎伝ばで生じる現象をさらに複雑にする。ここでは、傾斜円管（テーパ管）内で、旋回流をともなう火炎の伝ば特性を分析することが重要であると考え、そのため、本研究ではテーパ管内の非定常火炎挙動について時系列PIV計測を用いて分析することを目的とする。

2. 実験方法と装置

本研究で使用した予混合燃焼器を図1に示す。燃料ノズルには、スワローの上流に直径1 mmの円形の穴を18個配置している。この研究では、角度が変更可能な旋回羽根を使用する。旋回羽根の内径は56 mmで、外径は70 mmである。本研究では旋回羽根角度は 15.0° と 22.5° に設定し、入口部での幾何形状によるスワール数はそれぞれ0.24と0.37である。管長さが $L=350$ mmで、入口の内径が $D=60$ mmの円筒形のガラス管を使用して混合管をモデル化し、石英ガラスで作成して、レーザ光を透過し、火炎の挙動と流れ場を可視化する。ここで、石英ガラス管のうち、管出口（管A：入口内径60 mm，出口内径80 mm）に向かって断面積が拡大する管Aと、管出口（管B：入口内径60 mm，出口内径40 mm）に向かって縮小する管Bの2種類を用いた。両テーパ管の傾斜角度はいずれも 1.6° である。混合ガスは、石英ガラス管軸上に沿って旋回流を伴って流れ、管出口から大気に出流する。円柱ガラスの出口面の20 mm下流に配置された火炎の保持部を設けた。これは直径12 mmのセラミック製である。本研究では、火炎の保持部からガラス管を通して上流側に伝ばする火炎挙動について分析した。管内の瞬時流れ場を可視化するために、時系列PIV測定を実施した。圧縮機から酸化剤として空気を、フィルタを使用して、水分やゴミを取り除いた後、燃焼器に供給した。本研究では天然ガスの主燃料である、メタン (CH_4) を燃料として使用した。時系列PIV測定では、可燃性オリーブオイルをトレーサとして使用した。このトレーサを使用することにより、流れ場だけでなく、詳細な火炎形状も測定可能となる。粒子表面で反射した散乱強度画像は、測定領域の前面に配置した高速カメラ (Photron FASTCAM 1024 x 1024 pixel, 12bit) で撮影する。図1において、 x と y はそれぞれ円筒ガラスの中心軸からの半径方向距離と円形管の中心位置からの軸方向距離を表す。原点は中心軸上にあり、図1のテーパ管の上流入り口から下流175 mmの距離に設定した。 x - y 測定平面では、火

Fig. 1 Schematic view of model combustor with tapered circular tubes.

- (a) Tube expanding toward the outlet (Tube A: inlet inner diameter 60 mm, outlet inner diameter 80 mm).
- (b) Tube narrowing toward the outlet (Tube B: inlet inner diameter 60 mm, outlet inner diameter 40 mm).

Fig. 2 Experimental apparatus.

炎の挙動と流れ場の干渉挙動が可視化されることが考えられる．ここでは画像計測の周期は 2000 Hz に設定した．0.5 ms の時間間隔で区切られた 2 枚の粒子画像が計測され，露光時間を 0.5 ms とした．一定時間間隔でこれら 2 枚の画像から，粒子表面で散乱した粒子強度の画像パターンの変位距離を計算し，速度ベクトルを測定した．次に，管表面からの反射の影響を低減するために，各計測画像から背景画像を差し引く処理を行った．PIV 計測の処理には再帰的相互相関法を用いた．

図 2 には，高速 PIV 測定のための実験系と光学機器の概略図を示す．圧縮機を用いて空気を圧縮し，その後空気流路は二つに分岐し，一方の流路は，圧力容器内のラスキンノズルを通じてオリーブオイルを入れた容器を通

Tabel 1 Flow conditions.

Taper tube	Swirl vane angle, $\alpha(^{\circ})$	Swirl number, S	Air ratio at the flash back limit, λ	Laminar flame speed at the flash back limit (m/s)
A	15.0	0.242	1.77	0.088
	22.5	0.374	1.94	0.056
B	15.0	0.242	1.18	0.319
	22.5	0.374	1.93	0.057

過させた。容器内では、オリーブオイルの微粒子を含む気泡がオイル/空気界面で破裂し、直径 $1\text{ }\mu\text{m}$ 未満のオイル粒子が空气中に放出される。混入するオイル粒子の濃度を一定に保持するために、容器内を通過する空気量は一定とした。可燃物であるオリーブオイルをトレーサとして使用しているため、流れ場だけでなく、詳細な火炎形状も測定可能である。トレーサを可視化するために、DPSS（ダイオード励起固体レーザ、波長 532 nm 、平均出力 4 W ）レーザを使用する。このレーザ光を光ファイバで伝送し、コリメータを用いて厚さ 1 mm のレーザシートを形成する。圧縮機から分岐したもう一方の流路は、実験条件を満たす空気流量を供給するために用いる。PIV 測定に用いた高速度カメラの空間分解能は 0.08 mm であった。前に述べたように、画像の計測周期は 2000 Hz に設定した。このサンプリング周期では、検出可能な最小速度は、空気流量 Q_{air} を使用して計算された平均流速の $1/10$ ($V_{\text{ave}}=0.59\text{ m/s}$) であり、平均流速 V_{ave} で移動するトレーサ粒子はレーザシート厚さの約 3 分の 1 を通過することになる。本実験では、旋回強さを表す指標としてスワール数 S を用い、スワール形状 (R_i : 内半径, R_o : 外半径) と羽根角度 α の幾何的寸法から式 (1) を用いて算出した (Johnson et al., 2005).

$$S = \frac{2}{3} \tan \alpha \frac{1-R^3}{1-R^2} \quad (R = R_i / R_o) \quad (1)$$

3. 実験結果と考察

表 1 に各条件における旋回羽根角度 α 、スワール数 S 、逆火限界における空気比 λ 、その時の層流燃焼速度をそれぞれ表している。本実験では空気流量、 $Q_{\text{air}}=100\text{ NL/min}$ を一定にして行った。このとき、軸方向の平均速度は、円管入口で 0.59 m/s に相当する。以下の手順で逆火限界での空気比の測定を行った。逆火は圧縮機からの空気流量 Q_{air} を一定に保持しながら、燃料流量 Q_{fuel} を増加させて誘発させた。実験では管出口から上流方向に火炎がテーパ管内を伝ばし、出口から 100 mm の距離の位置に到達した場合を逆火と定義している。これは、この位置に到達した炎が再び下流に戻ることが生じなかったためである。逆火限界における空気比は 5 回の計測の平均を求めている。また、層流燃焼速度は PREMIX コード (Kee et al., 1993) を用いた次元自由伝ば火炎の計算により算出した。また、関連する熱物性値は GRI-MECH 3.0 (Smith et al., 1999) により求めた。拡大管 A での逆火限界は、旋回流の強度が弱い、羽根角度 15.0° では空気比は 1.77 であるのに対して、羽根角度 22.5° の場合には 1.94 となり、相対的に燃料希薄で逆火するようになった。この時、層流燃焼速度で比較すると、逆火限界での層流燃焼速度は約 0.64 倍になっている。一方、縮小管 B の場合には、羽根角度 15.0° での逆火限界の空気比は 1.18 となり、拡大管 A の場合の羽根角度 15.0° での逆火限界に比べて相対的に燃料が過濃条件での逆火になっている。また、縮小管 B の旋回流の強度が相対的に強い、羽根角度 22.5° の場合には逆火限界での空気比は 1.93 となり、旋回流の強さによる逆火限界空気比の差異が拡大管 A の場合に比較してかなり大きくなっている。この時、層流燃焼速度で比較すると、逆火限界での層流燃焼速度は約 0.18 倍になっている。

Fig. 3 Time-series flow fields and flame shapes in Tube A. (a) $\alpha = 15.0^\circ$, $\lambda = 1.77$ and unburned condition, (b) $\alpha = 15.0^\circ$, $\lambda = 1.77$ and burned condition, (c) $\alpha = 22.5^\circ$, $\lambda = 1.94$ and unburned condition and (d) $\alpha = 22.5^\circ$, $\lambda = 1.94$ and burned condition.

Fig. 4 Time-series flow fields and flame shapes in Tube B. (a) $\alpha = 15.0^\circ$, $\lambda = 1.18$ and unburned condition, (b) $\alpha = 15.0^\circ$, $\lambda = 1.18$ and burned condition and (c) $\alpha = 22.5^\circ$, $\lambda = 1.93$ and unburned condition. In Tube B narrowed toward the tube outlet, the flow was accelerated in the downstream direction, so the flow in the radial direction was suppressed, and the flow was stable in the unburned conditions.

Fig. 5 Time-series flow fields and flame shapes in Tube B in the case of $\alpha = 22.5^\circ$, $\lambda = 1.93$ and burned condition. An unburned low-velocity region was formed further upstream than the flame tip was propagated, and the region was observed to progress ahead of the flame propagation.

Fig. 6 Axial velocity profiles in $y = 0$ mm in the case of $\alpha = 22.5^\circ$, $\lambda = 1.93$ and burned condition in Fig.5.

図3は拡大管Aを用いた各時刻における軸方向速度の測定結果を示す。これらの図では、軸方向速度 v 分布は疑似カラーで表示されている。図3から図5では、テーパ管軸 (y 軸) 方向の速度分布を示し、上(下流)方向を正とし、赤で表示し、下(上流)方向を負とし、青で表示した。図中、燃焼条件では、既燃ガス領域においてトレーサが消失した部分に関しては、黒色の領域で示している。図3(a)は旋回羽根角度 15.0° に設定した場合の未燃焼条件の結果を、図3(b)は角度 15.0° に設定した場合の燃焼条件での結果を示す。また、図3(c)は角度 22.5° に設定した場合の未燃焼条件の結果を、図3(d)は角度 22.5° に設定した場合の燃焼条件での結果をそれぞれ示す。図3中の t は任意に設定した時刻からの経過時間を示している。図3(a)から旋回角度が小さく、比較的旋回流強さが弱い未燃焼条件では、管内の中心軸付近に低速度領域が存在していることがわかる。この低速度領域は、拡大管A内の旋回流による低圧領域によって生成されたものと考えられる。図3(b)では、未燃焼の条件でみられる中心部の低速度領域に沿って、火炎が上流側に伝ばする様子が見られた。また、図3(c)の羽根角度 22.5° では図3(a)と比較して、より顕著な低速度領域が中心部に存在していることがわかる。図3(d)では、中心部に存在する低速度領域に沿って、火炎が上流側に伝ばする様子が見られた。火炎先端の幅は、(d) $t = 440$ ms の結果と(b) $t = 460$ ms の結果を比較すると、旋回羽根角度がより大きな 22.5° に設定した図3(d)の場合には、図3(b)の場合よりも細い形状をしていることがわかる。

図4および図5には縮小管Bを用いた各時刻における軸方向速度の測定結果を示す。図4(a)は旋回羽根角度 15.0° に設定した場合の未燃焼条件での結果を、図4(b)は角度 15.0° に設定した場合の燃焼条件での結果をそれぞれ示す。また、図4(c)は角度 22.5° に設定した場合の未燃焼条件での結果を、図5は角度 22.5° に設定した場合の燃焼条件での結果をそれぞれ示す。縮小管Bでの未燃焼状態を表す図4(a)および(c)の結果では空間的に速度が変動していることがみられるが、負の軸方向速度は明確には確認できない。各図において、 t は任意に設定した時刻からの経過時間を示す。拡大管Aでは、下流方向への減速流であり、中心部領域に存在する低速度領域と周囲の高速度領域の間にせん断層にともなう渦を伴う流れが形成される。一方、出口に向かって先細くなっている縮小管Bでは、下流方向への加速流であるため、半径方向外側への流れが抑制され、渦の発生が抑えられて、流れが安定し、上流方向への逆流は見られない。また、燃焼条件では、図4(b)の旋回羽根角度が 15.0° の場合には、伝ばする火炎の先端上流部付近に、熱膨張によると考えられる低流速領域が見られる。

この場合とは異なり、旋回羽根角度が 22.5° の場合には、図4(c)での未燃焼の条件では中心軸に近い領域で、 15.0° の場合と比較して、低流速領域が見られる。これは、旋回強さが相対的に強まったためであると考えられる。さらに、図5での燃焼条件では、火炎先端が伝ばするよりもさらに上流側に未燃焼の低流速領域が形成され、火炎の伝ばに先んじて進展する挙動がみられた。この挙動の原因の一つは渦糸駆動メカニズムによると考えられる。これは、火炎先端の熱膨張などの効果により形成される渦糸の孤立波によって、誘起される流れが火炎の伝ばに関与していると考えられる(佐藤他, 2010)。 $t = 230$ ms では、火炎先端よりも上流側に長さが 60 mm 以上の低流速領域が形成された。形成された低流速領域に沿って、火炎が上流側に伝ばすることが確認された。 $t = 263$ ms と 380 ms においても、火炎の上流領域に逆流領域が形成され、火炎が上流側に伝ばする挙動が認められた。

図6には図5に表した縮小管Bを用いた各時刻における軸方向速度の測定結果から、各時刻における $y = 0$ mm での半径方向分布を表す。 $t = 80$ ms では、比較的一様な下流方向の軸方向速度をもつ分布となっているが、 $t = 140$ ms では、火炎が上流側に伝ばしてくるのに伴い、中心軸付近に低流速領域が形成されている。さらに、 $t = 230$ ms では中心軸付近において、逆流が生じている領域が存在することがわかる。

図7は拡大管Aの場合に関して $y = 0$ mm における軸方向速度の時間平均半径方向分布を示す。図7(a)には旋回羽根角度が 15.0° の場合を、図7(b)には旋回羽根角度が 22.5° の場合の結果を示す。図中に未燃焼条件での平均速度分布を黒線で、燃焼条件での平均速度分布を赤線でそれぞれ示している。使用しているトレーサ粒子は高温領域では消滅するため、燃焼ガス領域での流速測定には適用できなかった。このため、図7に赤線で示した燃焼条件での平均速度分布は、火炎先端が管内を上流側に伝ばし、図3で $y = 0$ mm に達するまでの未燃焼領域における時間平均軸方向速度を表している。拡大管Aの場合は、未燃焼条件および燃焼条件ともに中心部に低速領域が形成されている。図7(a)に示した旋回羽根角度が 15.0° の場合には未燃焼状態と燃焼状態での差異はほとんど見られなかった。一方、図7(b)に示した旋回羽根角度が 22.5° の場合は中心部に形成される低流速領域の速度は旋

(a) $\alpha = 15.0^\circ$ and $\lambda = 1.77$

(a) $\alpha = 15.0^\circ$ and $\lambda = 1.18$

(b) $\alpha = 22.5^\circ$ and $\lambda = 1.94$

(b) $\alpha = 22.5^\circ$ and $\lambda = 1.93$

Fig. 7 Radial profiles of time-averaged axial velocity under the unburned and the burned conditions in Tube A.

Fig. 8 Radial profiles of time-averaged axial velocity under the unburned and the burned conditions in Tube B.

回転角度 15.0° の場合と比較して、より低い速度領域が形成されていることがわかり、燃焼状態の場合には逆流を示す領域も形成されていることが分かった。

図 8 は縮小管 B の場合に関して $y=0\text{ mm}$ における軸方向速度の時間平均半径方向分布を示す。図 8(a)には旋回羽根角度が 15.0° の場合を、図 8(b)には旋回羽根角度が 22.5° の場合の結果を示す。図 8 に未燃焼条件での平均速度分布を黒線で、燃焼条件での平均速度分布を赤線でそれぞれ示している。また、赤線で示した燃焼条件での平均速度分布は、火炎が図 4 および図 5 で $y=0\text{ mm}$ に達するまでの未燃焼領域における時間平均軸方向速度を表している。図 8(a)に青線で示した平均速度は、流量条件から求まる断面平均速度を示している。図 8 (a)の旋回羽根角度が 15.0° の条件では、未燃焼条件および燃焼条件ともに中心部に明確な低速領域の形成は見られず、両者の条件での差異はほとんど見られなかった。一方、図 8(b)の旋回羽根角度が 22.5° の場合は中心部に形成される低流速域の速度は旋回角度 15.0° の場合と比較して、未燃焼条件で、中心部に低速度領域の形成が見られ、燃焼条件では未燃焼条件と比較して、差異の大きな低速度領域が認められた。これは図 5 に現れたように中心部付近に低流速領域が形成され、火炎の伝播に先んじて上流側へそれが進展することで、中心部領域の軸方向速度が大きく低下した分布になったと考えられる。拡大管 A と縮小管 B ともに相対的に旋回が弱い、羽根角度 15.0° の場

合には未燃と燃焼状態での平均軸方向速度分布はほぼ等しい。しかし、旋回角度が相対的に強い羽根角度 22.5° の場合には、未燃状態に比較して、燃焼状態では、平均軸方向速度分布はより中心部で低速度を取る分布となっており、特に縮小管 B の場合には、羽根角度が 15.0° と 22.5° での中心部領域での平均速度の差異が大きくなっている。このことから、縮小管 B の場合、逆火限界での層流燃焼速度の差異を大きくしていると考えられる。

なお、以前に行った実験から、内径が $D=60\text{ mm}$ の一定断面をもつ円形管を用いた旋回羽根角度 22.5° の場合には、未燃焼条件では中心部に低速度領域が形成されていること、および燃焼条件では火炎は管内中心部付近に形成されている低流速度領域に沿って、上流方向へ伝ばすることが認められた（市川他, 2015b）。

4. 結 言

時系列 PIV を使用して、下流方向へ向かって、拡大するテーパ円管と縮小するテーパ円管内の旋回流を伴う予混合火炎の動的挙動を分析した。さらに、旋回羽根角度を 15.0° と 22.5° の 2 通りについて、旋回流の強さを変化させて行った。得られた結果を以下に示す。

(1) 拡大管および縮小管ともに、旋回羽根角度をより大きくした場合に、逆火限界の空気比がより希薄の条件で生じることがわかった。この逆火限界での層流燃焼速度は拡大管の場合、旋回羽根角度を大きくすると、約 0.64 倍になり、縮小管の場合には、約 0.18 倍程度となり、その差異が縮小管の場合に特に大きくなった。

(2) 未燃焼条件では、拡大管の場合には未燃混合気流が下流に向かって減速流であり、中心部には低速流領域が形成され、周囲の高速度領域とのせん断層に渦を伴う流れが誘起された。一方、縮小管では、下流に向かって流れが加速され、渦の形成が抑えられ、流れは安定しており、上流方向への逆流は見られなかった。

(3) 燃焼条件では、旋回羽根角度が 15.0° の場合には、拡大管の条件では、火炎は管内の中心部付近に形成されている低流速度領域に沿って、上流方向へ伝ばをした。縮小管の条件では、火炎の先端部に熱膨張による低流速領域が局所的に形成された。一方、旋回羽根角度が 22.5° の場合には拡大管の条件では、 15.0° の場合と同様に火炎は管内中心部付近に形成されている低流速度領域に沿って、上流方向へ伝ばをした。

(4) 縮小管の条件では、旋回羽根角度が 22.5° の場合には 15.0° の場合とは火炎挙動が大きく異なり、火炎先端よりも上流方向に低流速度領域が拡大して形成され、火炎はその低流速度領域に沿って上流方向へ伝ばした。また、火炎が伝ばするとともにその低流速度領域は上流方向へ進展した。このため、縮小管では羽根角度が 22.5° の場合は 15.0° の場合に比較して、かなり希薄条件で逆火限界が生じたと考えられる。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP19K04215 の助成を受けたものです。また、本研究は当時の岐阜大学工学部熊崎貴文氏（大学院生）にご協力いただいた。ここに記し謝意を表す。

文 献

- Cheng, R.K., Littlejohn, D., Strakey, P.A. and Sidwell, T., Laboratory investigations of a low-swirl injector with H_2 and CH_4 at gas turbine conditions, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32 (2009), pp. 3001-3009.
- Fritz, J., Kröner M. and Sattelmayer, T., Flashback in a swirl burner with cylindrical premixing zone, *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2001* (2001), Paper No. 2001-GT-0054.
- Heeger, C., Gordon, R.L., Tummers, M.J., Sattelmayer, T. and Dreizler, A., Experimental analysis of flashback in lean premixed swirling flames: upstream flame propagation, *Experiments in Fluids*, Vol. 49 (2010), pp. 853-863.
- Ichikawa, Y., Komiyama, M. and Koyama, A., Study on premixed flame behavior in a cylindrical combustor with variable swirl vanes, *Proceedings of International Gas Turbine Congress 2015* (2015a), pp. 1332-1340.
- 市川雄一, 小宮山正治, 小山敦史, 希薄予混合燃焼器における火炎伝播挙動に及ぼす旋回強さの影響, *日本機械学会論文集*, Vol. 81, No. 827 (2015b), DOI: 10.1299/transjsme.14-00624.
- Ishizuka, S., Flame propagation along a vortex axis, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28 (2002), pp. 477-542.

- Johnson, M.R., Littlejohn, D., Nazeer, W.A., Smith, K.O. and Cheng, R.K., A comparison of the flowfields and emissions of high-swirl injectors and low-swirl injectors for lean premixed gas turbines, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30 (2005), pp. 2867-2874.
- Kee, R.J., Grcar, J.F., Smooke, M.D. and Miller J., A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flames, Sandia Report (1993), SAND85-8240.
- Komiyama, M., Kumazaki, T. and Nishida, S., Reciprocating propagation of premixed flame using time-variable-angle swirl vanes, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.16, No.2 (2021), DOI: 10.1299/jtst.2021jtst0022.
- Kröner, M., Fritz, J. and Sattelmayer, T., Flashback limits for combustion induced vortex breakdown in a swirl burner, *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002* (2002), Paper No. GT-2002-30075.
- 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* (2011), Paper No. IGTC2011-0209.
- 佐藤裕也, 篠田昌久, 山下博史, 渦輪に沿った高速火炎伝播のメカニズム, *日本燃焼学会誌*, Vol.52, No.161 (2010), pp.224-232.
- Shtork, S.I., Cala, C.E. and Fernandes, E. C., Experimental characterization of rotating flow field in a model vortex burner, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31 (2007), pp. 779-788.
- Smith, G.P., Golden, D.M., Frenklach, M., Moriarty, N.W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C.T., Hanson, R.K., Song, S., Gardiner, W.C., Lissianski, V.V. and Qin, Z., GRI-MECH 3.0 (1999), available from <<http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/text30.html>>, (参照日2021年7月15日).
- Stöhr, M., Sadanandan, R. and Meier, W., Experimental study of unsteady flame structures of an oscillating swirl flame in a gas turbine model combustor, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32 (2009), pp. 2925-2932.
- Syred, N., A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 32 (2006), pp. 93-161.
- Thumuluru, S.K. and Lieuwen, T., Characterization of acoustically forced swirl flame dynamics, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32 (2009), pp. 2893-2900.
- Turrell, M.D., Stopford, P.J., Syed, K.J. and Buchanan, E., CFD simulation of the flow within and downstream of a high-swirl lean premixed gas turbine combustor, *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2004* (2004), Paper No. GT2004-53112.

References

- Cheng, R.K., Littlejohn, D., Strakey, P.A. and Sidwell, T., Laboratory investigations of a low-swirl injector with H₂ and CH₄ at gas turbine conditions, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32 (2009), pp. 3001-3009.
- Fritz, J., Kröner M. and Sattelmayer, T., Flashback in a swirl burner with cylindrical premixing zone, *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2001* (2001), Paper No. 2001-GT-0054.
- Heeger, C., Gordon, R.L., Tummers, M.J., Sattelmayer, T. and Dreizler, A., Experimental analysis of flashback in lean premixed swirling flames: upstream flame propagation, *Experiments in Fluids*, Vol. 49 (2010), pp. 853-863.
- Ichikawa, Y., Komiyama, M. and Koyama, A., Study on premixed flame behavior in a cylindrical combustor with variable swirl vanes, *Proceedings of International Gas Turbine Congress 2015* (2015a), pp. 1332-1340.
- Ichikawa, Y., Komiyama, M. and Koyama, A., The effect of swirl intensity on flame propagation behavior in lean premixed burner, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol. 81, No. 827 (2015b), DOI: 10.1299/transjsme.14-00624.
- Ishizuka, S., Flame propagation along a vortex axis, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28 (2002), pp. 477-542.
- Johnson, M.R., Littlejohn, D., Nazeer, W.A., Smith, K.O. and Cheng, R.K., A comparison of the flowfields and emissions of high-swirl injectors and low-swirl injectors for lean premixed gas turbines, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30 (2005), pp. 2867-2874.
- Kee, R.J., Grcar, J.F., Smooke, M.D. and Miller J., A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flames, Sandia Report (1993), SAND85-8240.

- Komiyama, M., Kumazaki, T. and Nishida, S., Reciprocating propagation of premixed flame using time-variable-angle swirl vanes, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.16, No.2 (2021), DOI: 10.1299/jtst.2021jtst0022.
- Kröner, M., Fritz, J. and Sattelmayer, T., Flashback limits for combustion induced vortex breakdown in a swirl burner, *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002* (2002), Paper No. GT-2002-30075.
- 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* (2011), Paper No. IGTC2011-0209.
- Sato, Y., Shinoda, M. and Yamashita, H., Mechanism of high-speed flame propagation along a vortex ring, *Journal of the Combustion Society of Japan*, Vol.52 No.161 (2010), pp.224-232 (in Japanese).
- Shtork, S.I., Cala, C.E. and Fernandes, E. C., Experimental characterization of rotating flow field in a model vortex burner, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31 (2007), pp. 779-788.
- Smith, G.P., Golden, D.M., Frenklach, M., Moriarty, N.W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C.T., Hanson, R.K., Song, S., Gardiner, W.C., Lissianski, V.V. and Qin, Z., GRI-MECH 3.0 (1999), available from <<http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/text30.html>>, (accessed on 15 July, 2021).
- Stöhr, M., Sadanandan, R. and Meier, W., Experimental study of unsteady flame structures of an oscillating swirl flame in a gas turbine model combustor, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32 (2009), pp. 2925-2932.
- Syred, N., A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 32 (2006), pp. 93-161.
- Thumuluru, S.K. and Lieuwen, T., Characterization of acoustically forced swirl flame dynamics, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32 (2009), pp. 2893-2900.
- Turrell, M.D., Stopford, P.J., Syed, K.J. and Buchanan, E., CFD simulation of the flow within and downstream of a high-swirl lean premixed gas turbine combustor, *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2004* (2004), Paper No. GT2004-53112.