旋回流を伴う希薄予混合燃焼における火炎伝播挙動に及ぼす流れ場の影響

The Effect of Flow Field on Flame Propagation Behavior in Lean Premixed Combustion with Swirling Flow

市川 雄一*・小宮山 正治**・小山 敦史*

Yuichi ICHIKAWA, Masaharu KOMIYAMA and Atsushi KOYAMA

(Received September 25, 2015)

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. Flashback into the fuel nozzle causes serious damage to combustors. So, in this study we aim to clarify the relationship between the flame behavior and the flow fields in the premixed combustors with swirling flow by applying high-speed stereo particle image velocimetry (PIV) measurement. In this measurement, use of olive oil particles as tracer particles permits us to capture not only the flow fields but also the flame behavior. Then, we prepared two experimental conditions on the flow fields which have different swirl intensity; swirl number $S = 0.242$ and 0.633 . These different conditions on swirl intensity can be realized by using a variable swirler whose vane angle is changeable. This variable swirler makes it possible to independently change of swirl intensity. In $S = 0.633$, it is clarified that both axial velocity and circumferential velocity of premixed gas upstream the flame tip have relationships with flame propagation velocity. In short, the local strengthening of swirl intensity in the vicinity of flame tip influences the flame propagation velocity when swirl intensity is strong. On the other hand, it is found that flame propagation velocity has relation to only axial velocity of premixed gas under $S = 0.242$. Briefly, the change in eddy structure of swirling flow influences the flame propagation velocity when swirl intensity is weak.

Key Words: Gas Turbine, Lean Premixed Combustion, Flashback, High-speed Stereo PIV

1. 緒言

2011年に発生した原子力発電所における事故以降、火力発電が果たす役割が大きくなっているため、これまで高効率な発電に大きく貢献してきた産業用ガスタービンに注目が集まっている。一方、近年では二酸化炭素など温室効果ガスの増加が原因と考えられている地球温暖化やそれに伴う異常気象が大きな問題となっているため、ガスタービンには更なる高効率化が求められている。そのため、熱効率向上の有効な手段として、燃料を燃焼させる温度を上昇させる傾向にあるが、それに伴って、光化学スモッグや酸性雨の原因となる窒素酸化物 (NO_x) の排出量は増加するため問題となる。そこで、産業用ガスタービンの一部では、空気過多の状態では燃料と空気を混合させた後、燃焼させる希薄予混合燃焼が採用されている。予混合燃焼では、従来用いられてきた拡散燃焼に比べて、燃料と空気の混合が不十分なために生じる局所的高温部を低減することができる

め、 NO_x 生成を抑制する効果がある。しかし、予混合燃焼は火炎の安定範囲が狭く、逆火や振動燃焼などのデメリットがある。本研究で中心に扱う逆火とは、火炎が燃料や酸化剤の供給方向に逆らって上流側へ伝播する現象であり、燃料・酸化剤供給部などを焼損させ機器の信頼性低下にも繋がる。

そのため、工業的には火炎の伝播限界が重要な要素の1つであり、火炎伝播の限界に関する報告^{1),2)}がいくつかある。それに加えて、逆火発生メカニズム解明のため基礎的な現象として詳細に解析を行っている研究報告^{3),4)}もある。また、逆火は火炎伝播の形態によって一般的に、(1) 壁面付近の境界層における火炎伝播¹⁾、(2) 乱流燃焼速度の増加による火炎伝播、(3) 燃焼の不安定性に起因する火炎伝播、(4) 渦崩壊による火炎伝播に分けられる。特に、ガスタービン燃焼器において見られる旋回流を伴う流れ場での逆火では、渦崩壊による火炎伝播に起因するものが主要なものとして捉えられている。従来までの研究としては、円管内

* 大阪大学大学院工学研究科 機械工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University (2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan)

** 岐阜大学工学部 機械工学科 (〒201-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Gifu University (1-1 Yanagido, Gifu, Gifu, 201-1193 Japan)

で誘起される逆火に対して、粒子画像流速測定法 (PIV) と OH-LIF の同時計測を行い、流れ場の可視化と火炎面の位置を明らかにし、周囲の再循環領域と火炎面の相互関係を実験的に検証した結果、再循環領域の先端における流れ場の変化が逆火と密接に関連していることが報告されている⁵⁾。同様に PIV と OH-LIF の同時計測を渦心の歳差運動 (PVC) を伴う流れ場に適用し、PVC の周期に合わせて変化する流速と OH 分布のパターンが明らかにされている⁶⁾。また、旋回を伴う燃焼器における流れを実験的に分析し、一定燃料流量で空気流量を増加させた場合のノズル出口に形成される円錐形状の予混合火炎の挙動を観察した報告⁷⁾もある。これらは、旋回流を伴う流れ場における逆火に注目したが、その強さが流れ場や火炎形状（本研究では火炎が存在する領域を指す）そして圧力変動に与える影響も報告されている⁸⁾。

しかし、旋回流中における火炎の逆火は、渦崩壊に伴う非定常な流れ場と火炎伝播が相互干渉する複雑な現象であるため、そのメカニズムは未だ説明されていない部分が多い。そこで、筆者らは過去に予混合燃焼器を模擬したガラス円管などから成る実験用燃焼器で撮影カメラ 1 台による時系列 PIV 計測を行い、流れ場分布と火炎形状を同時に取得することを行った⁹⁾。そして、火炎先端（本研究では最も上流側に存在する火炎面を指す）の周りに存在する未燃予混合気の火炎伝播方向流速と火炎の伝播挙動に関する相互関係について時系列に沿って明らかにした。本報では、さらに詳細な火炎伝播のメカニズムを解明するため、旋回流を伴う流れ場における火炎伝播に関して重要な役割を果たす旋回流の周方向速度と火炎伝播の相互関係を明らかにすることを目的とした。そのため、時間的に一定に固定した旋回強さ 2 種類の流れ場に対して、2 台の高速度カメラを用いた時系列ステレオ PIV 計測を行い、火炎先端周辺に存在する未燃予混合気の流速に関して、旋回流の周方向を含む測定平面内 3 方向成分と、火炎伝播挙動の両者を同時にかつ高い時間分解能で連続的に取得した。

2. 実験装置・方法

実際のガスタービン燃焼器は複数の燃焼器から成り、本研究では予混合燃焼が行われている燃焼器の 1 つを模擬した実験用燃焼器 (Fig.1) を対象に実験を行った。燃料については、多くのガスタービンで燃料として用いられている天然ガスの主成分であるメタン (CH_4) を用いた。燃焼器底部より燃料と空気を別々に取り入れ、燃焼器中心軸にあり直径 1 mm の穴が 18 個空けられた燃料ノズルから燃料を噴き出し、周囲の空気と混合させ、その混合ガスをスワローに通すことにより旋回を与えた。本実験で用いたスワローは Fig.2 で示すように、36 枚の羽根から成り立っており、羽根角度を変更させることによって、旋回流の強さを独立に変化させることができる仕組みになっている。旋回を与

Fig.1 Schematic view of premixed combustor.

Fig.2 Variable swirler.

えられた混合ガスは、燃焼器の閉鎖空間を模擬したガラス円筒管（長さ 350 mm 内径 60 mm）の内部を流れ大気中へ開放される。ガラス円筒管の材質については、レーザ光を透過し、円筒管内部の火炎形状と流れ場を可視化できるようにするため、透明な合成石英とした。また、ガラス円筒管上端より 20 mm 上方に保炎器として直径 12 mm のセラミック製円柱を設置した。特に、火炎先端の動的挙動と周囲の未燃予混合気の流れ場を同時に捉えるため、Fig.1 の斜線部が示すガラス管出口付近の領域に対して時系列ステレオ PIV 計測を導入し、両者の相互関係について考察を行った。また、使用する座標系については、ガラス管上端面における中心を原点とし、半径方向に x 軸を、ガラス管軸上方向に y 軸を、紙面垂直方向に z 軸を設定する。

Fig.3 Experimental apparatus for time-series stereo PIV measurement.

次に、**Fig.1** に示した実験用燃焼器を含む全体的な実験装置について、その概念図である **Fig.3** を用いて述べる。PIV 計測とは、流れ場に混入させたトレーサ粒子がレーザシート面内を移動する量から面に平行な速度 2 成分を測定する手法である。本実験では、上記のトレーサ粒子として直径約 $1\ \mu\text{m}$ のオリーブオイル粒子を利用し、**Fig.3** が示すように、コンプレッサから供給された空気に混入させ実験用燃焼器に導いた。トレーサ粒子については、オリーブオイルが満たされた圧力容器内に空気を供給し、ラスキンノズルを通して生成している。また、オリーブオイル粒子は、可燃性であり火炎中では焼失するため、流れ場と同時に火炎形状を取得することが可能である。PIV 用の光源には波長 $514.5\ \text{nm}$ の連続発振 Ar^+ レーザ (Spectra Physics 社製 Stablite2017、定格出力 $6\ \text{W}$) を用いた。このレーザ光をファイバに入射させ、ファイバ出口に取り付けたコリメータによって厚さ $1\ \text{mm}$ のレーザシートを作成した。このコリメータについては、ガラス管からの反射を防ぐため測定範囲に対して斜め下方から照射するよう設置した。

ここで、本報で用いるステレオ PIV 計測について述べる。ステレオ PIV 計測とは、上述したカメラ 1 台による通常の PIV 計測にもう 1 台のカメラを加えることによって、測定平面に平行な速度ベクトル 2 成分に加え、面に垂直な成分も算出できる。本実験では、時系列ステレオ PIV 計測を行うにあたり、トレーサ粒子からの散乱光強度を強め、相対的にガラス管表面における反射の影響を低減するため、2 台の高速度カメラ (Photron 社製 FASTCAM SA-3 model

120K-M2 $1024 \times 1024\ \text{pixels}$) をレーザシート前面に互いに 30° の角度をなす位置に向かい合わせた。さらに、左右斜め方向から撮影する画像のピントを各カメラで画像全体にわたって合わせるため、カメラの撮像面とレンズ主平面そしてレーザシートの延長線が一点に交わるようにカメラとレンズを設置するシャインフラグ配置を用いた。各カメラで撮影した粒子画像には歪みが生じる。そのため、写像関数を用いて生じた画像の歪みを修正した。その修正方法は以下の通りである。まず初めに、 $2.5\ \text{mm}$ 間隔で水平方向と垂直方向にそれぞれ点を打った歪み補正用のキャリブレーション用プレートを用意する。そして、燃焼器を模擬した円筒管内にこのキャリブレーション用プレート設置し、左右にシャインフラグ配置した場所から撮影した 2 枚の画像とプレート正面から撮影した 3 枚の画像を撮影する。**Fig.4** は、この 3 枚の画像を示している。正面から撮影した画像と左右から撮影したそれぞれの画像において、プレート上の対応する点の位置から写像関数を求める。ここで得た写像関数を用いて左右から撮影した歪んだ粒子画像を修正する。左右の画像に再帰的相互相関法を用いて変位ベクトル計測処理を行い、上記の手順で相互相関法を用いることによって、歪みを排除した 2 次元 2 成分速度ベクトルを算出する。最後に、2 次元 3 成分速度ベクトルを、左右それぞれのカメラで撮影した 2 枚の 2 次元 2 成分速度ベクトルから求める。また、曲率半径の小さい円筒管内での PIV では、円筒面上でのレーザ光の反射とトレーサ粒子像が重なるため、正しく速度ベクトルを算出することが困難となる。そ

Fig.4 Calibration of the distorted images.

Fig.5 Flashback limit map.

ここで、本研究では円筒管からの反射の影響を低減するために、粒子を含んだ未燃予混合気を流さない状態にて石英ガラス管にレーザ光を照射させた画像を取得し、トレーサ粒子画像から反射による光強度を差し引いている。なお、撮影における空間分解能は高速度カメラのピクセル間距離に相当し約 0.10 mm であった。撮影速度については、検出可能最小速度が空気流量 Q_{air} から算出される平均流速 v_{ave} (本実験では最小流量を $Q_{air}=50$ NL/min としたため、 $v_{ave}=0.3$ m/s) の 1/10 以下であり、同じく平均流速で動いたトレーサ粒子が厚さ 1 mm のレーザシートを突き抜けるために必要な時間の 1/10 程度になる 2000 frame/s とした。

実験条件については、旋回強さを数種類用意し、未燃状態におけるガラス管出口温度を 293 K、空気流量 Q_{air} を 50 NL/min または 100 NL/min、燃料流量 Q_{fuel} については各旋回強さにおいて逆火に至る限界値に設定した。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、スワラ形状 (R_i : 内径、 R_o : 外径) と羽根角度 α の幾何的情報から式 (1) を用いて算出した¹⁰⁾。

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

3. 結果と考察

まず、旋回流の旋回強さが逆火の特性に与える影響を明らかにするため、旋回強さを示すスワール数が異なる旋回流中において、逆火限界空気比の測定を行った。逆火限界空気比の測定方法については、空気流量 Q_{air} を 50 または 100 NL/min に固定したまま、燃料流量 Q_{fuel} を徐々に増やすことによって逆火を引き起こし、その時の空気比を逆火限界空気比とした。本実験における逆火の定義としては、火炎全体が保炎器を離れ、戻ることができない時とし、具体的にはガラス管下端より 10 mm 上方の位置に至ったとき

とした。逆火限界空気比の値は、5 回測定した平均値とし、標準偏差も Fig.5 に示す。本実験では、PIV 計測のトレーサ粒子として燃料の一部となるオリーブオイル粒子を空気に混入させているため、逆火限界空気比に対して、トレーサを混ぜない場合と比較して最大 2 % 上昇の影響がある。

そして、この Fig.5 で示した各空気流量 Q_{air} におけるスワール数 S に対する逆火限界空気比の結果のうち、旋回強さが大きく異なる 2 条件に対して、燃焼場での時系列ステレオ PIV 計測を行った。検討した条件は、旋回強さが強い条件 A ($Q_{air}=50$ NL/min かつ $S=0.633$) と、旋回強さが弱い条件 B ($Q_{air}=100$ NL/min かつ $S=0.242$) である。燃料流量については、各実験条件における逆火限界空気比になるように設定した。この逆火限界空気比に設定した各条件では、火炎は上下へ振動しながら上流へ伝播していく。そこで、火炎が上流側へ逆火していく時間帯と下流側へ後退する時間帯に着目して、ステレオ PIV 計測の結果を示すことにする。Fig.6(a) と (b) は条件 A において、Fig.7(a) と (b) は条件 B において、逆火した時間帯と後退した時間帯における結果を時系列に沿って並べている。これらの図では、ガラス管軸方向流速 v と紙面垂直方向流速 w について 6 ms 毎の瞬時場 2 枚を上下 1 組にして 9 組示した。各図における t は任意の時刻からの時間経過である。各組上側のガラス管軸方向流速 v は、上 (下流) 方向を正とし、下 (上流) 方向を負として表している。一方、各組下側の紙面垂直方向流速 w は、紙面手前方向を正とし、紙面奥方向を負として示している。さらに、本実験で適応した計測方法では、燃焼場において火炎も捉えることができるため、火炎は図中央に存在する黒色の領域にて表す。

まず初めに、Fig.6 と Fig.7 で紙面垂直方向流速 w の全体的な比較によって、条件 A と B における相違点を述べる。Fig.6 では全体を通して、旋回流の渦心 (紙面垂直方向流速 w がほぼ 0 の部分) がガラス管中心軸に沿って安定的に

Fig.6 Time-series axial/circumferential flow field and flame propagation behavior in condition A.

形成されていることが分かる。一方、Fig.7では渦心が湾曲している瞬時場が多く見られる。つまり、条件Aでは渦心の歳差運動が顕著ではない一方、条件Bでは歳差運動が激しくその半径が大きいと言える。これは、条件Aでは旋回強さが強いいため旋回流の渦構造が安定的であり、条件Bでは旋回強さが弱いいため渦構造が不安定であることが原因として考えられる。

次に、各条件において逆火時と後退時それぞれに着目し

て考察する。まず、条件Aにおいて逆火する際の火炎伝播挙動とガラス管軸方向流速 v または紙面垂直方向流速 w の相互関係について、Fig.6(a)を用いて述べる。軸方向流速 v に注目すると、 $t=288$ から 294 msにかけて逆流している領域が徐々に火炎に近づいている様子が分かる。そして、 $t=300$ ms以降、逆流領域と火炎が衝突すると、火炎先端が尖り、火炎は上流側へと伝播して行くことが分かる。その間の紙面垂直方向流速 w の分布については、上述した渦心の

Fig.7 Time-series axial/circumferential flow field and flame propagation behavior in condition B.

ガラス管半径方向の幅は、火炎幅に比べて十分細く、火炎先端から上流側まで一様である。このことは、火炎先端上流側で、旋回流が安定的に形成され、旋回流の強さも他の時間帯に比べて、比較的強かったことを意味している。つまり、一時的に旋回流の強さが強まった結果、旋回流の中心は負圧となり、上流への流れが加速され、その結果、火炎が上流側へと伝播したと言える。

また、Fig.6(b) が示す後退時においては、火炎伝播挙動

とガラス管軸方向流速 v または紙面垂直方向流速 w の相互関係に関して、以下のことが言える。この条件 A では、旋回流による再循環流れによってガラス管中心軸付近においては、主に上流への逆流状態となっている。しかし、 $t = 237 \text{ ms}$ における軸方向流速 v の瞬時場において、 $y = -80 \text{ mm}$ 付近でガラス管中心軸でも、下流への流れが分布していることが分かる。この下流方向への流れをもつ流体塊はその後、火炎先端に近づき、 $t = 255 \text{ ms}$ では両者が衝突して

いる。この瞬間、火炎先端の形状は下に凸から平坦に変わり、その後火炎が下流側へと押し戻されている様子が分かる。この火炎が後退していく間の紙面垂直方向流速 w との相互関係については、以下のことが明らかとなった。特に、火炎が後退する初期の時間帯である $t = 255 \text{ ms}$ から 267 ms においては、火炎先端付近で旋回流の渦心が、ガラス管半径方向に広がっている。また、この渦心が広がった領域は、軸方向流速 v の分布において、下流への流れとなっている箇所と一致する。このことから、火炎先端において局所的に旋回流の旋回強さが弱まり、旋回流の中心でも下流への流れが発生し、その流れに乗って火炎は下流側へと後退したと言える。

それでは、旋回強さが弱かった条件 B においても、逆火時と後退時における火炎伝播挙動とガラス管軸方向流速 v または紙面垂直方向流速 w の相互関係について示す。逆火時における軸方向流速と火炎挙動の関係は、Fig.7(a) が示すように、火炎先端周りだけ極局所的に低速流れが存在していることが分かる。この時の紙面垂直方向流速の分布を見ると、湾曲している旋回流の渦心に関して、その曲率が後述する後退時と比べて小さいことが分かる。

一方、Fig.7(b) が示す後退時に関しては、特に後退が顕著であった $t = 216$ から 228 ms では、それ以前には存在していた火炎先端付近における流速 0 付近の低速領域がほぼなくなっていることが分かる。また、紙面垂直方向流速については、 $t = 216 \text{ ms}$ 以降、旋回流の渦心が大きく湾曲しており、その曲率は大きくなっていることが分かる。つまり、条件 B のような旋回強さが弱い流れ場では、動きの大きい歳差運動によって、火炎先端付近の渦構造が変化し、軸方向流速が影響されることによって、火炎の伝播挙動も決定されることが分かった。

ここで、火炎伝播挙動と流れ場の相互関係を定量的に示すため、火炎伝播速度とガラス管軸方向速度 v または紙面垂直方向速度 w の関係を明らかにする。Fig.6 と 7 で示した 6 ms 毎の瞬時場のうち任意の一枚において ($t = t_0$ とする) 火炎先端位置を求め、これと次の 6 ms 後 ($t = t_0 + 6$) の火炎先端位置との移動距離から求めたものを $t = t_0$ における火炎伝播速度 v_{flame} と定義し、下流方向へ後退する速度を正、上流方向へ逆火する速度を負とした。そして、 $t = t_0$ における火炎先端付近での未燃予混合気に関するガラス管軸方向速度 v と紙面垂直方向速度 w を横軸に、火炎伝播速度 v_{flame} を縦軸に取り、両者の相互関係を考察する。Fig.8 と 9 は、それぞれ条件 A ($Q_{\text{air}} = 50 \text{ NL/min}$ かつ $S = 0.633$) と条件 B ($Q_{\text{air}} = 100 \text{ NL/min}$ かつ $S = 0.242$) において示したものである。

まず、条件 A の結果を表した Fig.8 では、軸方向速度と火炎伝播速度には比例関係が見られ、値自体も近いことが分かる。つまり、旋回流の強い条件では、火炎先端付近における未燃予混合気の軸方向への速度が火炎先端の伝播速度に影響を与え、その上、火炎の燃焼速度に比

Fig.8 Axial/circumferential velocity and flame propagation velocity in condition A.

Fig.9 Axial/circumferential velocity and flame propagation velocity in condition B.

べて、火炎先端付近に存在する未燃予混合気の軸方向流速が十分に大きいため、火炎伝播速度と軸方向流速は近い値となったと考えられる。次に、火炎先端付近における未燃予混合気の周方向速度の影響について以下に述べる。Fig.8 が示すように、周方向速度が大きくなるにしたがって、火炎伝播速度は負の値となっていくことが分かる。つまり、局所的な旋回強さが強くなると、火炎は逆火することを示している。よって、火炎先端付近に存在する未燃予混合気の軸方向速度と周方向速度は共に、火炎伝播速度に影響を与えることが明らかとなった。これは、火炎先端付近において、旋回流の一時的な旋回強さの強弱に伴って、旋回流の中心軸上では、旋回流による負圧の大きさが変化し、軸方向流速が影響を受け、それに伴って火炎伝播速度が変化したためと言える。

一方、旋回強さの弱い条件 B の結果を示した Fig.9 について述べる。この条件においても高旋回場条件 A と同様に、

火炎伝播速度と火炎先端付近における未燃予混合気の軸方向速度は比例関係にあることが分かる。つまり、旋回流の弱い条件でも火炎先端付近に存在する未燃予混合気の軸方向速度が、火炎伝播速度に影響を与えていると言える。次に、この条件における火炎先端付近に存在する未燃予混合気に関して、その周方向速度による火炎伝播速度への影響の有無について述べる。Fig.9 が示すように、ある一定の周方向速度に対して、火炎伝播速度は不規則な値を取っており、周方向速度と火炎伝播速度には関係性がないことが分かる。よって、旋回流の旋回強さが弱い場合は、軸方向速度と火炎伝播速度には比例関係があるものの、旋回強さが強い場合とは異なって、周方向速度と火炎伝播速度に顕著な関係性はないことが明らかとなった。これは、旋回強さが弱い条件では、渦心の歳差運動によって火炎先端付近の渦構造が絶えず変化しているため、周方向速度よりも渦構造の変化が火炎挙動に影響を与えているためと考えられる。

4. 結 論

本研究では、ガスタービン燃焼器の一部を模擬した実験用燃焼器に対して時系列ステレオ PIV 計測を適応し、燃焼器内に発生させる旋回流の旋回強さの異なる場において、予混合火炎の伝播挙動と流れ場の相互関係について以下の知見を明らかにした。

1) 旋回強さが強い条件では、火炎先端付近に存在する未燃予混合気の燃焼器中心軸方向の速度は、火炎伝播速度に影響を与え両者は近い値となる。また、火炎先端付近の予混合気の周方向速度が速くなると、軸方向速度に関しては上流方向への流れが強くなり逆火に繋がる。つまり、

周方向速度も火炎伝播速度に影響を与える。

2) 旋回強さが弱い条件では、旋回強さが強い場合と同様に、燃焼器中心軸方向の速度は火炎伝播速度に影響を与える。しかし、火炎伝播速度は予混合気の周方向速度には影響を受けず、火炎先端付近の渦構造の変化に影響を受ける。

参 考 文 献

- 1) V. Kurdyumov, E. F. Tarrazo, J. -M. Truffaut, J. Quinard, A. Wangher and G. Searby: Proceedings of the Combustion Institute, **31** (2007) 1275-1282.
- 2) M. Kröner, J. Fritz and T. Sattelmayer: Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002 (2002) Paper No. GT2002-30075.
- 3) S. Ishizuka: Progress in Energy and Combustion Science, **28-6** (2002) 477-542.
- 4) N. Syred: Progress in Energy and Combustion Science, **32-2** (2006) 93-161.
- 5) M. Konle, F. Kieseewetter and T. Sattelmayer: Experiments in Fluids, **44** (2008) 529-538.
- 6) M. Stöhr, R. Sadanandan and W. Meier: Proceedings of the Combustion Institute, **32** (2009) 2925-2932.
- 7) T. Owaki and A. Umemura: Proceedings of the Combustion Institute, **31** (2007) 1067-1074.
- 8) Y. Huang and V. Yang: Proceedings of the Combustion Institute, **30** (2005) 1775-1782.
- 9) 市川雄一、小宮山正治、小山敦史：日本機械学会論文集、**81-827** (2015) 14-00624.
- 10) M. R. Johnson, D. Littlejohn, W. A. Nazeer, K. O. Smith and R. K. Cheng: Proceedings of the Combustion Institute, **30** (2005) 2867-2874.