

遡上スワールにより形成された循環流領域を持つ マイクロガスタービン燃焼器の開発*

(第3報, 一次燃焼領域の形状が燃焼器内ガス流動と燃焼特性に及ぼす影響)

佐々木 徹^{*1}, 天野 俊 輔^{*2}, 渡 辺 哲 也^{*3}
世取山 幸作^{*4}, 古 畑 朋 彦^{*5}, 新 井 雅 隆^{*6}

Development of Micro Gas Turbine Combustor with a Recirculation Zone Induced by an Upward Swirl (3rd Report, Effect of a Primary Zone Configuration on Spray Combustion Characteristics and Combustion Gas Flow)

Toru SASAKI, Shunsuke AMANO, Tetsuya WATANABE,
Kousaku YOTORIYAMA, Tomohiko FURUHATA and Masataka ARAI^{*7}

^{*7} Department of Mechanical System Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

A low NO_x combustor for kerosene-fueled micro gas turbine based on a new concept was proposed. The combustor consisted of primary and secondary combustion zones, and they were connected by a throat. A swirler was set between the primary and secondary combustion zones. In order to enhance recirculation of burned gas in the primary combustion zone, combustion air was introduced through the swirler and forced to flow upward to the combustor bottom. In this study, effects of configuration of primary combustion zone on combustion gas flow in it were investigated. The length of primary combustion zone, swirler vane angle, diameter of throat and height of guide vane were changed independently from the standard configuration. Distributions of gas flow in the primary combustion zone were measured with LDA. The relation between combustion stability and the distributions of gas flow was discussed, and it was found that appropriate combustion gas recirculation in the primary combustion zone was necessary to keep combustion stability high.

Key Words: Micro Gas Turbine, Swirl, Spray Combustion, Atomization, Low NO_x, Combustion Stability, Upward Swirl, LDA

1. 結 論

液体燃料を使用するマイクロガスタービンはコージエネレーションシステムとしての利用⁽¹⁾ばかりではなく、災害時の燃料確保および供給に関してロバスト性を有するため、非常用電源としても有用である。そのため液体燃料用低 NO_x 燃焼器としては、これまでも予蒸発・予混合方式の開発が進められてきた^{(2)~(7)}。一方、筆者らの研究グループでは排ガス再循環と高温低酸素燃焼を組み合わせた新しいコンセプトの液体燃料用噴霧燃焼器を提案してきた⁽⁸⁾。これは、一次燃焼領域の末端から燃焼用空気を上流に向かって導入し、燃焼ガスの上流への強制的な輸送を行うという方式である⁽⁹⁾。

著者らの研究グループが提案している燃焼器では、一次燃焼領域の形状が燃焼範囲、出口温度分布、排ガス成分濃度等の基礎的な燃焼特性に強く影響を及ぼすと考えられたことから、既報⁽¹⁰⁾では、一次燃焼領域の長さやスワールの羽根角度などの一次燃焼領域形状と燃焼特性の関係を検討し、基本的な燃焼器形状を決定した。さらに前報⁽¹¹⁾では、この基本燃焼器形状における一次燃焼領域内の流動を計測し、一次燃焼領域内における燃焼ガスの循環状況を明らかにした。

本研究では今後の燃焼器開発に有用な知見を得ることを目的として、一次燃焼領域の形状（一次燃焼領域の長さやスワールの羽根角度など）を基本燃焼器形状から変えた場合について、一次燃焼領域内の燃焼ガス流動を測定し、流動状況に対する一次燃焼領域の形状の影響を調査するとともに、燃焼ガスの循環状況と燃焼特性との関連を検討した。

* 原稿受付 2007年7月23日。

^{*1} 群馬大学大学院工学研究科(☎376-8515 桐生市天神町1-5-1)。

^{*2} 正員、(株)荏原総合研究所機械研究室(☎251-8502 藤沢市本藤沢4-2-1)。

^{*3} (株)ミツバ(☎376-8555 桐生市広沢町1-2681)。

^{*4} (株)ケーヒン(☎163-0539 東京都新宿区西新宿1-26-2号新宿野村ビル39階)。

^{*5} 正員、群馬大学大学院工学研究科。

^{*6} 正員、フェロー、群馬大学大学院工学研究科。

E-mail: arai@me.gunma-u.ac.jp

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す。燃焼実験装置は燃料と空気の供給系、温度測定系およびガスサンプリング系から構成されている。燃焼用空気には常温の空気をブローアから供給し、燃焼器出口は大気開放とした。燃料には市販の白灯油を使用し、高圧ポンプで加圧して供給した。

燃焼器断面と燃焼器形状に関わる形状パラメータを図2に示す。燃焼器は、スワラ、燃焼筒、燃料ノズル、点火プラグ、ガイドベーンで構成されている。一次および二次燃焼領域の直径は 136 mm である。一次燃焼領域の底部には燃焼ガスを燃料ノズル近傍に導くためのガイドベーンを設置した。また、スワラ出口にスワラプレートを取り付けた。燃料ノズルは、定格流量が 3.0Gallon/h で噴霧角が 90° のスワールノズル (Delavan 社製, 3.0Gallon/h 90° A) を使用した。

流速分布の計測は、すべて燃焼状態で行った。燃料流量は $M_f = 4.3$ g/s とし、一次燃焼領域の空気過剰率 λ は形状パラメータを変更した場合でも安定した燃焼が可能な 1.23 とした。

表1に今回検討した形状パラメータとそれらの値を示す。ここで取り上げた形状パラメータは、いずれも一次燃焼領域内での燃焼状態を左右するパラメータである。例えば一次燃焼領域燃焼筒長さを変えることにより循環領域の大きさや位置が変わり、燃焼ガスの滞在時間が変化することが予想され、スワラ羽根角度を変えると、燃焼用空気の旋回強さが変わり、燃料と空気の混合状態が変化すると考えられる。また、スロート部直径を小さくすると、スロート部を通過する燃焼ガスの流速が過大となり、吹き消えにより燃焼安定性が低下すると考えられる。さらに、ガイドベーンは遡上した燃焼ガスを燃料ノズルに効率よく導き、燃料の蒸発を促進する目的で設置されているが、その高さ

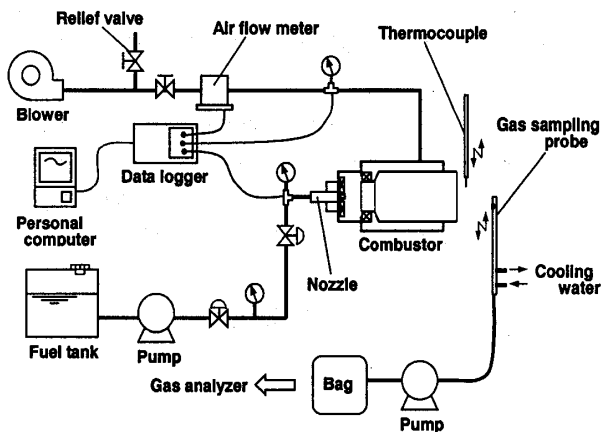


Fig. 1 Experimental setup

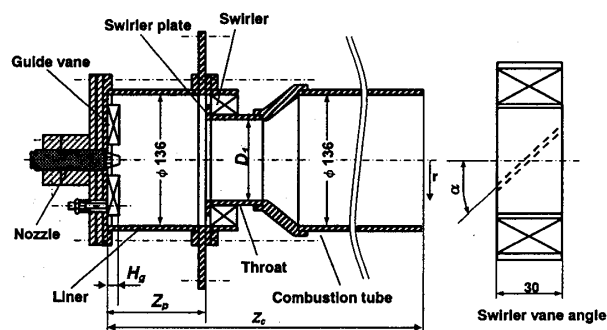


Fig. 2 Schematic of upward swirl combustor

Table 1 Experimental parameters

Parameter	Standard	Parametric study
Length of primary zone : Z_p	109 mm	(89), 109, (142), 175
Swirler vane angle : α	45 deg.	0, 45, 55
Diameter of throat : D_t	106 mm	87, (97), 106
Height of guide vane : H_g	22 mm	8, (15), 22

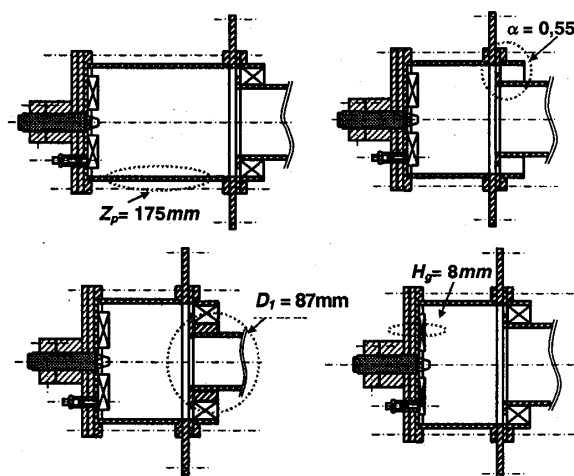


Fig. 3 Experimental parameters of combustor

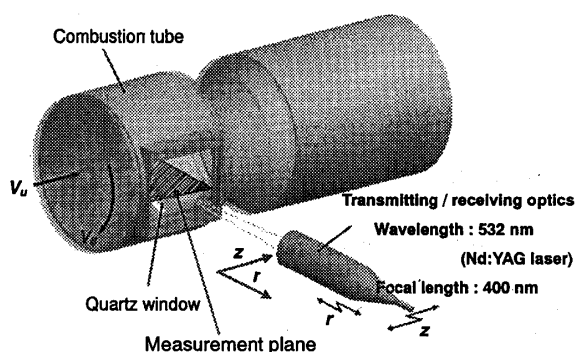


Fig. 4 LDA Measurement of gas velocity in the primary combustion zone

を変えることにより燃焼ガスの循環状態が変化し、燃料の蒸発挙動も変化すると予想される。図3は、各寸法パラメータと対応する箇所である。表1のスタンダ

ード形状は既報⁽¹⁰⁾で基本形状として採用した値である。本研究では、一次燃焼領域燃焼筒長さ Z_p 、スワール羽根角度 α 、スロート部直径 D_s 、ガイドベーン高さ H_g をそれぞれ表 1 に示す値に変更し、一次燃焼領域内部の燃焼ガス流速分布を測定した。

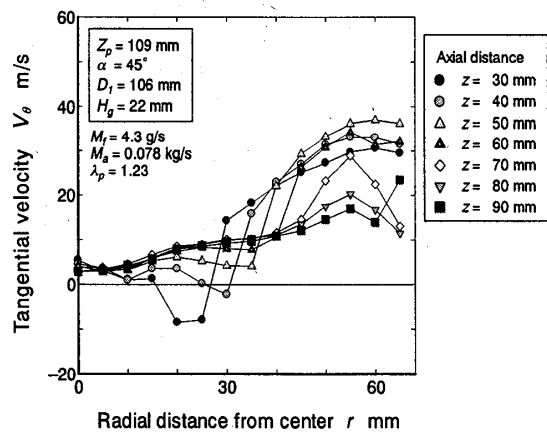
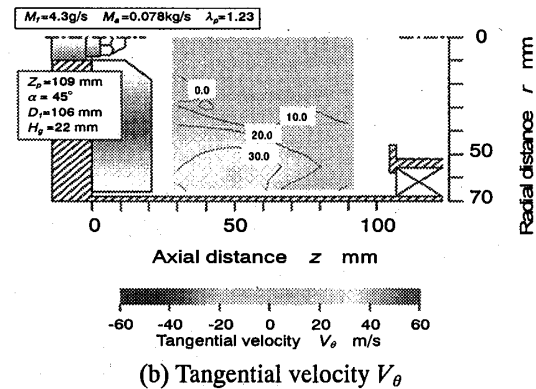
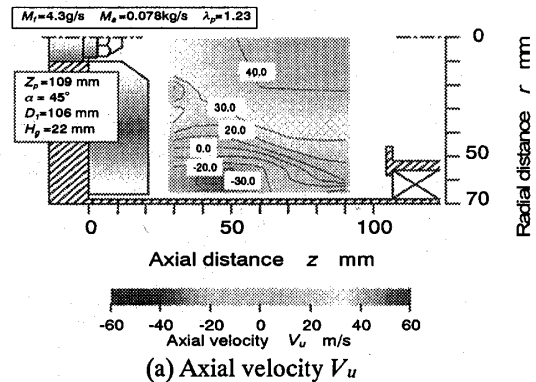
図 4 に一次燃焼領域内の速度分布計測方法を示す。石英ガラス窓付の燃焼筒を用い、LDA の後方散乱式光学系プローブにより燃焼器出口方向の速度成分 V_u [m/s] と旋回方向の速度成分 V_θ [m/s] について測定を行った。流速測定用のシード粒子には乾燥させた土粒を 250 μm 孔のふるいにかけてプロア入口から吸入させた。

3. 実験結果および考察

3・1 基本燃焼器形状における流速分布 基本燃焼器形状 (一次燃焼領域燃焼筒長さ $Z_p = 109$ mm, スワール羽根角度 $\alpha = 45^\circ$, スロート部直径 $D_s = 106$ mm, ガイドベーン高さ $H_g = 22$ mm) について測定を行った。(a) 燃焼器軸方向の速度成分 V_u と、(b) 旋回方向の速度成分 V_θ の分布を調べた結果を図 5 に示す。(c) は横軸に半径方向の座標 r をとり縦軸に V_θ の値を示したものである。図中の速度の値は、(a) では出口方向に向かう速度を正、(b) と (c) では燃焼筒底部から見て時計回りの方向の速度を正としている。

(a) の V_u 分布、(b) の V_θ 分布ともに前報⁽¹⁰⁾と同様の速度分布となっている。すなわちスワール出口から壁面に沿って燃焼器底部に向かい、ガイドベーン付近で向きを変え、中心軸付近では出口に向かうという循環流が形成されている。この循環流により、スワラプレート付近の燃焼領域から高温の燃焼ガスが燃料噴霧領域に供給され、燃料の蒸発が促進される。それにより予混合的な燃焼が生じ、高い燃焼安定性と低 NOx 燃焼が実現される⁽⁹⁾。なお、前報⁽¹⁰⁾では $\lambda_p = 1.5$ であるのに対し、本報では $\lambda_p = 1.23$ であり、供給空気流量を少なくしているため、速度は全体的に若干減少している。本研究では、これを基準として以降の燃焼器形状を変更した場合の結果と比較する。

3・2 一次燃焼領域の燃焼筒長さを長くした場合の流速分布 基本燃焼器形状に対し一次燃焼領域の燃焼筒長さを変化させた場合の安定燃焼範囲の測定結果を図 6 に示す。この図では、横軸に燃料流量 M_f 、縦軸に一次燃焼領域の空気過剰率 λ_p をとり、吹き消え時の空気過剰率を安定燃焼限界とした。基本燃焼器形状の場合 ($Z_p = 109$ mm) が最も広い安定燃焼範囲を示したが、 Z_p を基本燃焼器形状から短くした場合や、長くした場合には安定燃焼範囲が狭くなっている。また、一次燃



(c) Radial distributions of tangential velocity (r vs. V_θ)
Fig. 5 Flow velocity in primary zone ($\lambda_p = 1.23$)

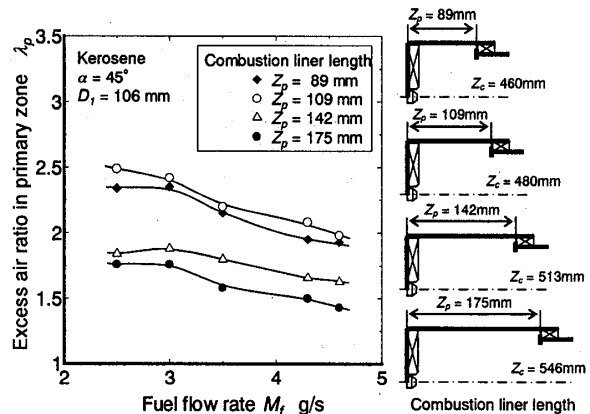


Fig. 6 Combustion characteristics on $M_f - \lambda_p$ diagram (liner effect)

焼筒長さを短くした場合の安定燃焼範囲や排ガス組成にはあまり変化が見られなかった⁽⁹⁾ため、ここでは

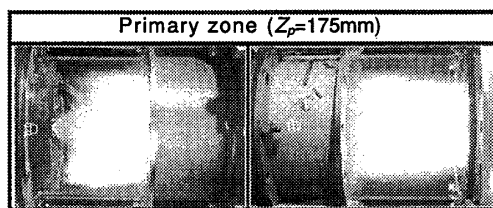
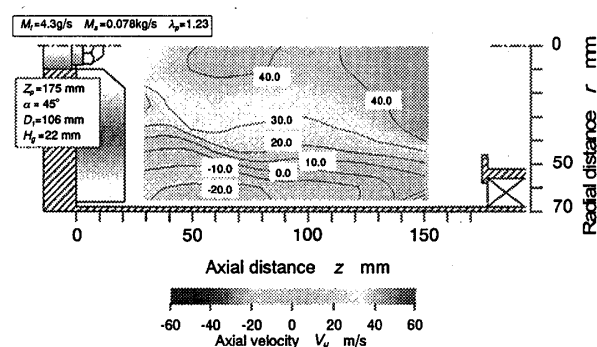
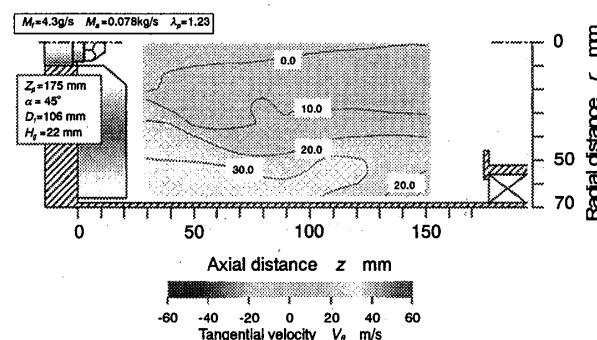


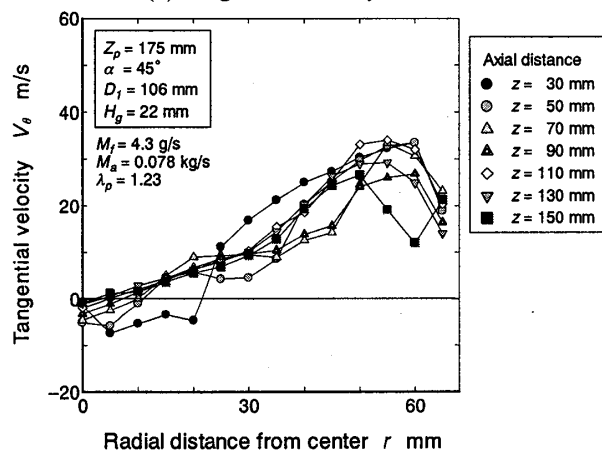
Fig. 7 Status of flame in primary combustion zone ($Z_p=175\text{mm}$)



(a) Axial velocity V_u



(b) Tangential velocity V_θ



(c) Radial distributions of tangential velocity (r vs. V_θ)

Fig. 8 Flow velocity in primary zone ($Z_p=175\text{mm}$, $\lambda_p=1.23$)

一次燃焼領域を長くした場合について検討した。

$Z_p=175\text{mm}$ とした場合の一次燃焼領域における火炎の写真を図7に示す。これは、一次燃焼領域の燃焼筒に石英ガラスを用い、燃焼器横方向から撮影したものである。燃料ノズルの位置は白線で示した。火炎形状観察用の石英ガラス製ライナーの長さが 175mm より短いため、装着位置を変えて一次燃焼領域全体の様子を撮影した。写真より、燃焼器底部から一次燃焼領域全体にわたって細長い輝炎が形成されていることがわかる。

一次燃焼領域内の流速分布を図8に示す。(a)の V_u 分布は、基本燃焼器形状の場合の速度分布を全体的に z 軸方向に引き伸ばしたような分布になっている。壁面近傍の流速が減少し、燃焼器底部に向かって増加するのは基本燃焼器形状の場合と同様であるが、速度の最大値は基本燃焼器形状の場合より低くなっている。また、一次燃焼領域出口付近の中心部で最も大きい速度を示すのも基本燃焼器形状の場合と同様であるが、それより上流の $z=50\sim 80\text{mm}$ の中心軸上にも速度の大きな領域が存在している。これは図7の火炎の写真からわかるように、 $Z_p=175\text{mm}$ の場合には、一次燃焼領域の中心軸付近の広い領域で燃焼が生じているためだと考えられる。このように高速で出口に向かう流れの領域が広がることにより安定燃焼範囲が狭くなっていると推察される。

(b)の V_θ 分布では、基本燃焼器形状の場合と異なり壁面近傍の値は $z=30\sim 150\text{mm}$ の範囲で大きな変化はなく、ガイドベーン近傍での増加も小さい。これは、ガイドベーンに向かう軸方向速度の低下に起因すると考えられる。従って、(c)の V_θ 分布の半径方向分布においては、 $z=30\text{mm}$ の場合を除いて、 V_θ が r に比例する剛体渦的な速度分布になっている。

3.3 スワール羽根角度を変えた場合の流速分布
基本燃焼器形状に対しスワール羽根角度を $\alpha=0^\circ$ および 55° に変更した場合の安定燃焼範囲の測定結果を

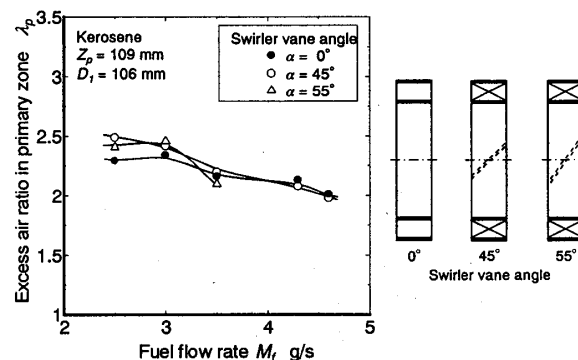


Fig. 9 Combustion characteristics on M_f - λ_p diagram (swirler effect)

図9に示す。 $\alpha = 0^\circ$ について測定する場合は燃焼器にスワラを取り付けず、スワラプレートからの空気流入口から直接一次燃焼領域内へ燃焼用空気を導入した。燃料流量が少ないときは、 $\alpha = 45^\circ$ の場合が最も広

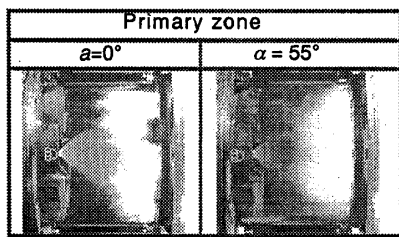
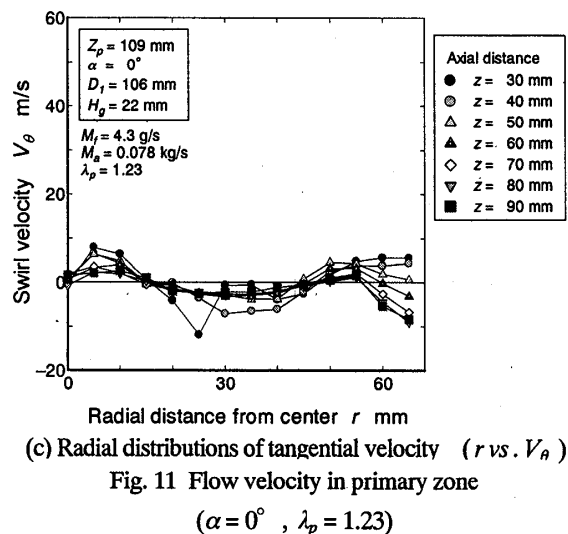
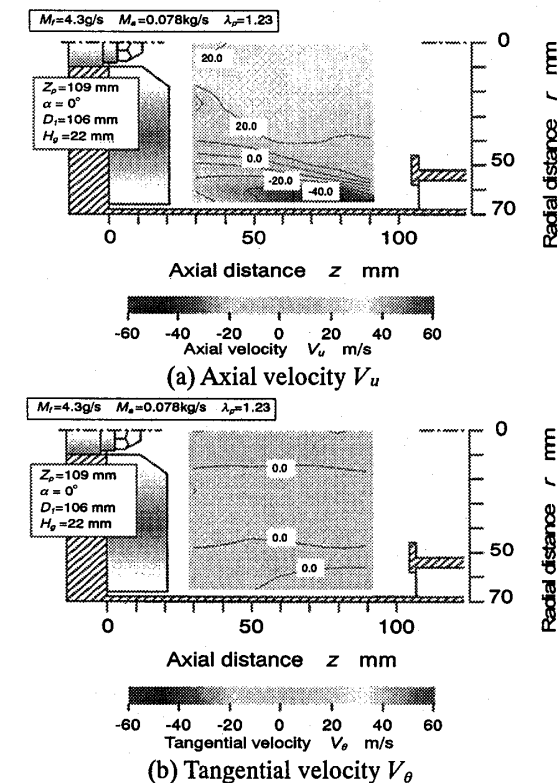


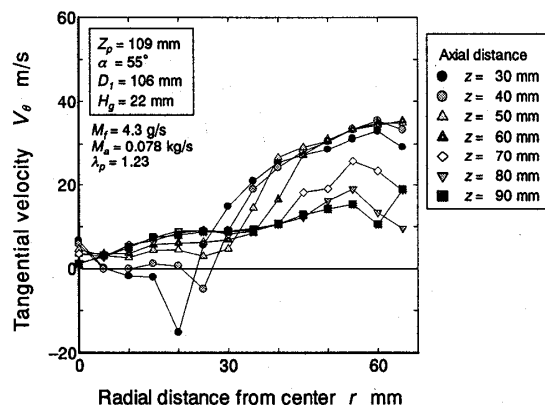
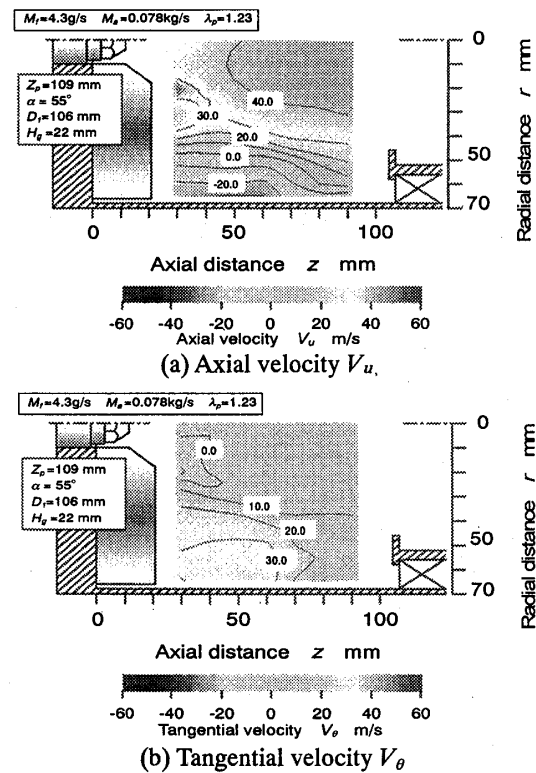
Fig. 10 Status of flame in primary combustion zone ($\alpha = 0^\circ, 55^\circ$)



(c) Radial distributions of tangential velocity (r vs. V_θ)

Fig. 11 Flow velocity in primary zone

($\alpha = 0^\circ$, $\lambda_p = 1.23$)



(c) Radial distributions of tangential velocity (r vs. V_θ)

Fig. 12 Flow velocity in primary zone

($\alpha = 55^\circ$, $\lambda_p = 1.23$)

い安定燃焼範囲を示したが、燃料流量が 3.5 g/s 以上になると $\alpha = 0^\circ$ の場合とほとんど差異がないことがわかる。 $\alpha = 55^\circ$ では $\alpha = 45^\circ$ の場合とほぼ同様の安定燃焼範囲となっているが、燃料流量の大きい $M_f = 4.3 \text{ g/s}$ や 4.6 g/s の場合では、スワラの圧力損失が大きくプロアからの空気流量が不足し、吹き消え限界が測定できなかった。

$\alpha = 0^\circ, 55^\circ$ とした場合の一次燃焼領域内の火炎の写真を図10に示す。この写真ではわかりにくいですが、 $\alpha = 0^\circ$ の場合には輝炎が、 $\alpha = 55^\circ$ の場合には主に青炎が形成されていた。従って $\alpha = 0^\circ$ の場合には燃料と空気の混合が悪く、予混合的な燃焼になっていないと推

察される。また、火炎形状を見ると $\alpha = 0^\circ$ の場合には、スワール出口付近から壁面に沿ってまっすぐに燃焼器底部に向かうような火炎となっているのに対し、 $\alpha = 55^\circ$ の場合には、スワール出口付近の火炎が中心軸方向に巻き込まれているような形状となっており、既報⁽⁹⁾の基本燃焼器形状の場合と似たような火炎となっている。

$\alpha = 0^\circ$ とした場合の一次燃焼領域内の流速分布を図 11 に示す。(a)の V_u 分布では、スワール出口近傍の燃焼器底部に向かう速度が 40 m/s 以上と速くなっているが、週上とともに低下している。また、中心軸付近の一次燃焼領域出口に向かう速度は 20 m/s 程度と基本燃焼器形状と比較して約半分になっている。これは火炎形状からわかるように、主な燃焼領域がスワール出口から壁面に沿う形で燃焼器底部に向かって伸びていることと対応している。(b), (c)の V_θ 分布では、スワールによる旋回を与えていないため燃焼筒内全域で低い値であった。以上から $\alpha = 0^\circ$ の場合は、基本燃焼器形状の場合と比較して流動状況や火炎形状が大きく異なることが明らかとなった。それにもかかわらず安定燃焼範囲があまり変わらなかったのは、スワール出口付近に吹き消えにくい拡散火炎が形成されたためと考えられる。また、既報⁽⁹⁾でも示したように $\alpha = 0^\circ$ の場合は、CO と HC の出口濃度が $\alpha = 45^\circ$ の場合と比較して高くなる。すなわち、旋回流のない場合には一次燃焼領域における燃料と空気の混合が悪化することを示している。従って燃焼用空気の旋回は燃料と空気の混合を促進する効果があると考えられる。次に、スワール羽根根角度を $\alpha = 55^\circ$ とした場合の一次燃焼領域内の流速分布を図 12 に示す。(a)の V_u 分布、(b), (c)の V_θ 分布ともに基本燃焼器形状と同様の速度分布が現れている。また、燃焼状態も $\alpha = 45^\circ$ の場合とほとんど変わらなかった。以上からスワール羽根根角度を 45° 以上にしても、圧力損失が増大するばかりで燃焼特性の改善につながらないことがわかった。

3・4 スロート部の直径を変えた場合の流速分布

基本燃焼器形状に対しスロート部の直径を $D_1 = 87$ mm および 97 mm に変更した場合の安定燃焼範囲の測定結果を図 13 に示す。基本燃焼器形状の場合($D_1 = 109$ mm)が最も広い安定燃焼範囲を示し、 D_1 を小さくするほど狭くなっていることがわかる。 $D_1 = 87$ mm とした場合の一次燃焼領域内の流速分布を図 14 に示す。(a)の V_u 分布では基本燃焼器形状と同様の速度分布が現れているが、一次燃焼領域出口付近の V_u は中心軸上で 43 m/s から 47 m/s と速くなっている。これは、スロート部の直径が小さくなったことにより、燃焼器出口に向かう

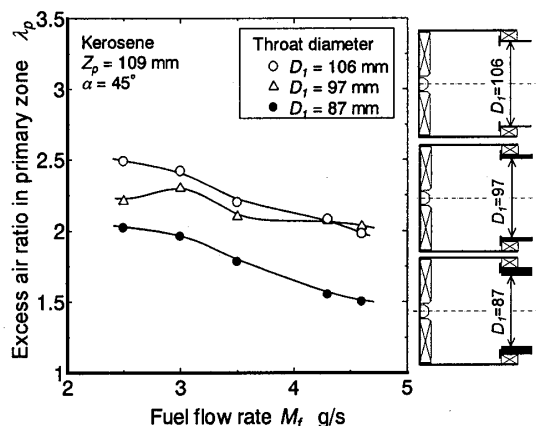
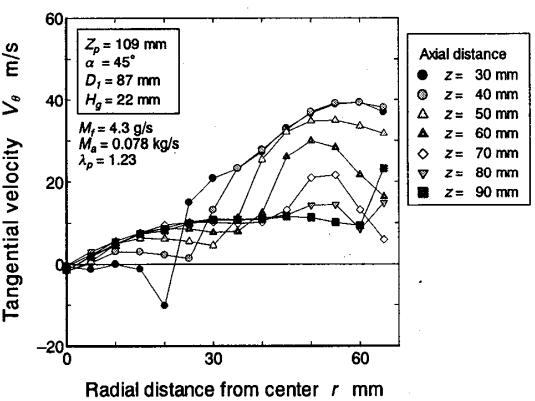
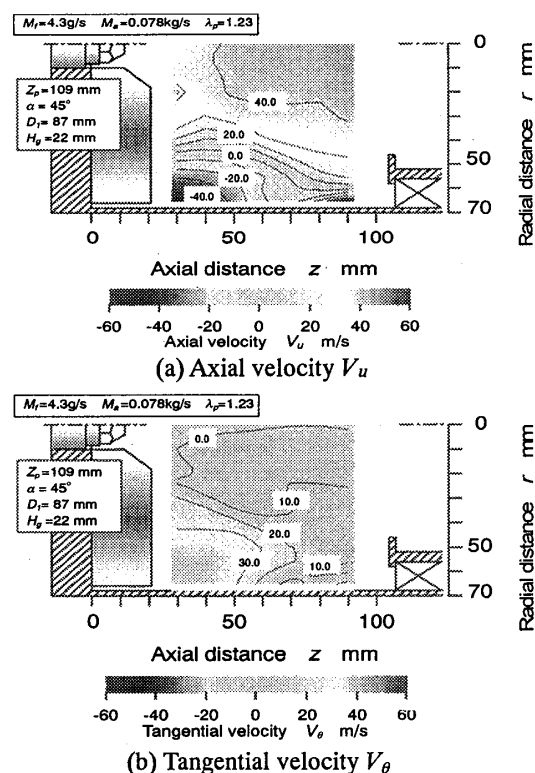


Fig. 13 Combustion characteristics on $M_f - \lambda_p$ diagram (throat effect)



(c) Radial distributions of tangential velocity (r vs. V_θ)

Fig. 14 Flow velocity in primary zone ($D_1 = 87$ mm, $\lambda_p = 1.23$)

空気の速度が速くなったためである。スロート部における燃焼ガスの速度の増加により火炎が吹き消えやすくなるために、安定燃焼範囲が小さくなったと考えられる。

(b), (c)の V_θ 分布では、基本燃焼器形状とあまり差はなかった。

3・5 ガイドベーン高さを変えた場合の流速分布
基本燃焼器形状に対しガイドベーン高さを $H_g = 8\text{ mm}$ および 15 mm に変更した場合の安定燃焼範囲の測定結果を図15に示す。基本燃焼器形状の場合($H_g = 22\text{ mm}$)が最も広い安定燃焼範囲を示し、 H_g を低くするほど狭くなっていることがわかる。

$H_g = 8\text{ mm}$ とした場合の火炎の写真を図16に示す。一次燃焼領域の空気過剰率 $\lambda_p = 1.23$ では、すでに一次燃焼領域で火炎が保持されていないことがわかる。また、燃料が燃焼筒壁面に付着しており、空気との混合状態も不良である。

一次燃焼領域内の流速分布を図17に示す。(a)の V_u 分布では、 $z = 30 \sim 40\text{ mm}$ の中心軸近傍の範囲で 50 m/s 以上の速い速度を示している。これにより燃料噴霧の形状が変化し、安定燃焼範囲が狭くなったと推察される。

(b), (c)の V_θ 分布では、ガイドベーン付近の $r = 20 \sim 25\text{ mm}$ の範囲での V_θ が大きくなっている。これはガイドベーン高さが低く、燃焼器底部において流れの旋

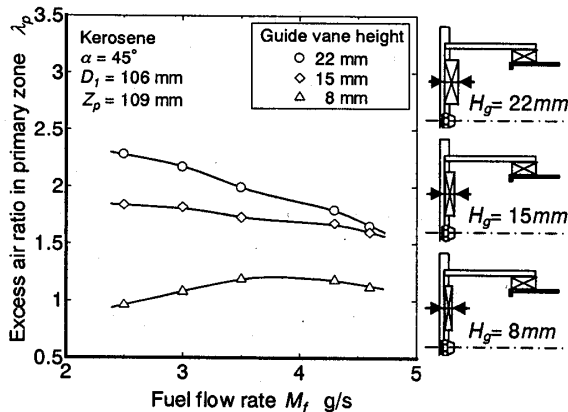


Fig. 15 Combustion characteristics on $M_f - \lambda_p$ diagram (guide vane effect)

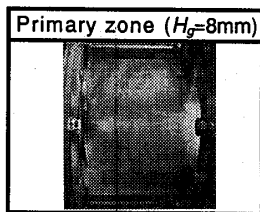
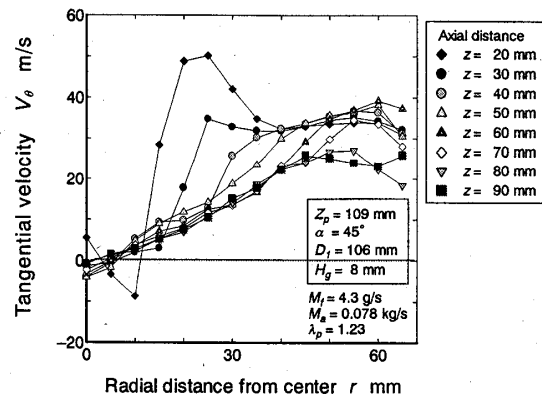
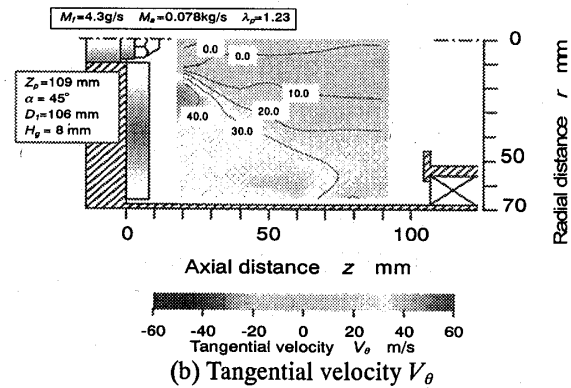
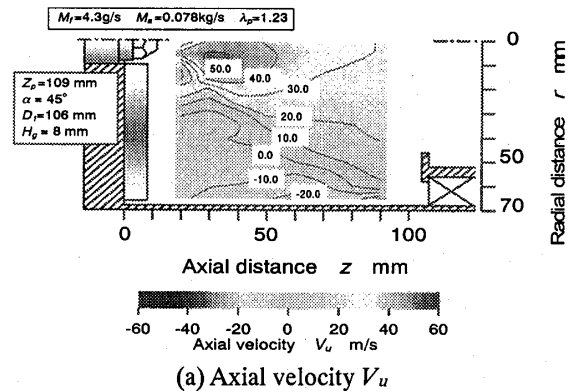


Fig. 16 Status of flame in primary combustion zone ($H_g = 8\text{ mm}$)



(c) Radial distributions of tangential velocity (r vs. V_θ)

Fig. 17 Flow velocity in primary zone ($H_g = 8\text{ mm}$, $\lambda_p = 1.23$)

回が維持されにくくなっているため、剛体渦的な速度分布から、ランキン渦的な分布に変化したことを示していると考えられる。また、剛体渦的な旋回が弱まった結果、中心軸方向に流れが向かいやすくなり、ノズル出口付近で(a)に示すように V_u が増加したと推察される。さらに V_θ の速度勾配が非常に大きいことから乱れが過大となり、保炎効果が低下したと考えられる。

4 結 言

迴上する旋回流を導入した新しいコンセプトの燃焼器を用い、燃焼器形状の変化が燃焼状態におよぼす影響について、一次燃焼領域内部の速度分布、燃焼状態を調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) 一次燃焼領域を長くした場合、燃焼ガスの速度分布は基本燃焼器形状を全体的に引きのばしたような分布になるとともに、中心軸付近で流速の大きな領域が拡大した結果、安定燃焼範囲が狭くなったと考えられる。
 - (2) スワラ羽根角度を変えた場合、どの条件でも安定燃焼範囲にほとんど差異はなかったが、 $\alpha = 0^\circ$ の場合には、火炎形状や流速分布が基本燃焼器形状の場合と大きく異なった。
 - (3) スロート部の直径を小さくした場合、一次燃焼領域出口の燃焼ガスの速度が速くなり、火炎が吹き消えやすくなるため、安定燃焼範囲が狭くなる。
 - (4) ガイドベーン高さを低くするとノズル近傍の軸方向速度が増加し、旋回方向の速度分布も剛体渦的な分布からランキン渦的な分布に変化するなど一次燃焼領域内の流れが大きく変化するため安定燃焼範囲が大幅に狭くなった。
- 以上の結果から、我々のグループが提案した燃焼器において、安定燃焼範囲を広く保つには、一次燃焼領域の燃焼ガスの循環状況を適切に維持することが重要であり、前報⁽⁹⁾において安定燃焼範囲から求めた基本燃焼器形状は理にかなっていたことがわかった。
- 謝 辞**
- 研究費の一部は平成 18 年度科学研究費補助金 (基盤研究 B) , 「液体燃料マイクロガスタービンを目的とした高乱流 BGR 超低 NOx 燃焼器の開発」によったことを記し、感謝の意を表す。
- 参考文献**
- (1) Osaka Gas, Development of a micro gas turbine cogeneration system, <http://www.osakagas.co.jp>.
 - (2) Brandt, M., Gugel, K.O. and Hassa, C., Experimental Investigation of the Liquid Fuel Evaporation in a Premix Duct for Lean Premixed and Prevaporized Combustion, *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.119(1997), pp.815-821.
 - (3) Lee, J.C.Y., Malte, P.C. and Benjamin, M.A., Low NOx Combustion for Liquid Fuels : Atomospheric Pressure Experiments Using a Staged Prevaporizer-premixer, *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.125(2003), pp.861-871.
 - (4) Gradingner, T.B., Inauen, A., Bombach, R., Kappeli, B., Hubschmid, W. and Boulouchos, K., Liquid-Fuel/Air Premixing in Gas Turbine Combustors: Experiment and Numerical Simulation, *Combustion and Flame*, Vol.24(2001), pp.422-443.
 - (5) Guin, C. and Trichet, P., Optimisation of a two-head lean prevaporised premixed combustor, *Aerospace Society Technology*, Vol.8(2004), pp.35-46.
 - (6) Wei, M., Wang, Y. and Reh, L., Experimental investigation of the prevaporized premixed (vpl) combustion process for liquid fuel lean combustion, *Chemical Engineering Process*, Vol.41(2002), pp.157-164.
 - (7) Liedtke, O., Schulz, A., Development of a new lean burning Combustor with fuel film evaporation for a micro gas turbine, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.27(2003), pp.363-369
 - (8) Arai, M., Amano, S. and Fujiwara, H., Combustion Characteristics in a Micro-Gas Turbine Combustor with a Recirculation Zone Induced by an Upward Swirl, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.71, No.703(2005), pp.962-969.
 - (9) Japan Patent Application, No.2004-32933, No.2004-32941, No.2004-32943, No.2004-32945.
 - (10) Yotoriyama, K., Amano, S., Fujiwara, H., Furuhashi, T. and Arai, M., Development of Micro Gas Turbine Combustor with a Recirculation Zone Induced by an Upward Swirl (Effect of a Primary Zone Configuration on Spray Combustion Characteristics), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.719(2006), pp.174-181.
 - (11) Sasaki, T., Amano, S., Yotoriyama, K., Watanabe, T., Furuhashi, T. and Arai, M., Development of Micro Gas Turbine Combustor with a Recirculation Zone Induced by an Upward Swirl (2nd Report; Effect of a Fuel Atomization on Combustion Characteristics and Measurement of Combustion Gas Flow in a Primary Zone), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, (in submitting).
 - (12) Furuhashi, T., Amano, S., Yotoriyama, K. and Arai, M., Development of can-type low NOx combustor for micro gas turbine (fundamental characteristics in a primary zone with upward swirl), *Fuel*, Vol.86(2007), pp.2463-2474.