The Japan Society of Mechanical Engineers

日本機械学会論文集(B編)
74巻740号(2008-4)

論文 No. 07-0678

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2報，燃料微粒化特性の燃焼特性に及ぼす影響と一次燃焼領域内の流動計測)

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

(2nd Report, Effect of a Fuel Atomization on Combustion Characteristics and Measurement of Combustion Gas Flow in a Primary Zone)

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, fundamental combustion characteristics such as lean combustion limit, exhaust gas composition and combustion gas temperature were measured using three fuel atomizers which rated flow rates were 3.0 gallon/h, 4.5 gallon/h and 6.0 gallon/h respectively. It was shown that the combustion stability and emission characteristics in the case of 3.0 gallon/h nozzle were superior to those in other cases. Further, gas velocity in the primary combustion zone was measured by Leaser Doppler Anemometer (LDA) and behavior of the recirculation of burned gas was investigated.

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

1. 緒　　論

マイクロガスタービンは，コージェネレーションシステムとして熱需要の多い病院，ホテル，スポーツ施設などへの導入が進められている(1)．また，液体燃料を用いるマイクロガスタービンは災害時でも燃料供給が容易なため，非常用電源としても有用であると考えられる．このような利用法ではマイクロガスタービンは主に都市部に設置されることになるが，ガスタービンの大気汚染物質排出に関してますます規制が強化される傾向にあり，特に低NOx化が要求されている．

ガスタービン燃焼器における液体燃料の低NOx燃焼法としては，予蒸発・予混合方式の開発が進められているが(2)~(7)，この方式では予蒸発器の制御が困難で出力の調整が難しいという問題がある．そこで著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た(8)．これは，噴霧燃焼器の内部で高温の燃焼ガスを一次燃焼領域に循環させるために，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)．これにより，高温低酸素雰囲気により着火を抑えて燃料の蒸発のみを促進することで，高温低酸素燃焼との相乗作用により低NOx燃焼が可能であることを見いだした(10)~(12)．高温低酸素燃焼は有効な低NOx燃焼法として知られている(13)~(18)．

本燃焼器では，特に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，前報(19)では，一次燃焼領域の長さやスワーラの羽根角度などの一次燃焼領域形状と安定燃焼範囲，排ガス特性の観点から基本的な一次燃焼領域形状を見い

* 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

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

だした．そこで本研究では，噴霧燃焼特性に大きく影響を及ぼす燃料微粒化特性に着目し，定格流量の異なる3つの燃料ノズルを用いて，燃料の微粒化特性が燃焼に及ぼす影響を調査した．さらに一次燃焼領域内の燃焼状況を詳細に把握し，燃焼器開発に有用な知見を得ることを目的として，基本一次燃焼器形状における一次燃焼領域内の燃焼ガス速度分布および濃度分布を測定した．

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を図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アから供給し，燃焼器出口は大気開放とした．一次燃焼領域内の火炎形状を観察する場合には石英ガラス製ライナーを用いた．燃焼器出口の燃焼ガス温度 T_g はφ0.3mm の Pt-Pt/Rh13%裸熱電対を用いて測定した．燃焼器出口の排気ガスは水冷プローブでサンプリングバッグに採取した後，排ガス測定装置（堀場製，MEXA-4000 FT）で分析し，HC (未燃炭化水素)，CO および NOx の濃度を測定した．

一次燃焼領域内の温度測定と燃焼ガス計測には燃焼筒壁面にφ4.4 mm の挿入孔を等間隔に設け，そこから熱電対およびプローブを挿入して測定した．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．燃料噴霧の粒径は粒径計測装置（Malvern 製 2600 PARTICLE SIZER）を用いて測定した．また，一次燃焼領域内の燃焼ガス速度分布の測定時には，石英ガラス観察窓付の燃焼筒を用い，レーザードップラー流速計(LDA)にて流速分布測定を行なった．

燃焼器断面を図2に示す．燃焼器は，スワーラ，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．燃焼筒の一次と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（A-A 断面）を設置した．またスワーラからの流れを絞り，燃焼筒壁面に沿った流れにして遡上する旋回流が一次燃焼領域の底部まで到達できるように，スワーラ出口にスワーラプレート（B-B 断面）を取り付けた．燃焼器各部の寸法は，一次燃焼領域長さを 109 mm，スワーラ羽根角度を 45°，羽根枚数 16 枚，スワーラの内径は 110 mm で，スロート部直径を 106 mm とした．これは，前報(19)で最適化した値である．

燃料ノズルは，標準では定格流量が 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）を使用したが，微粒化特性の影響

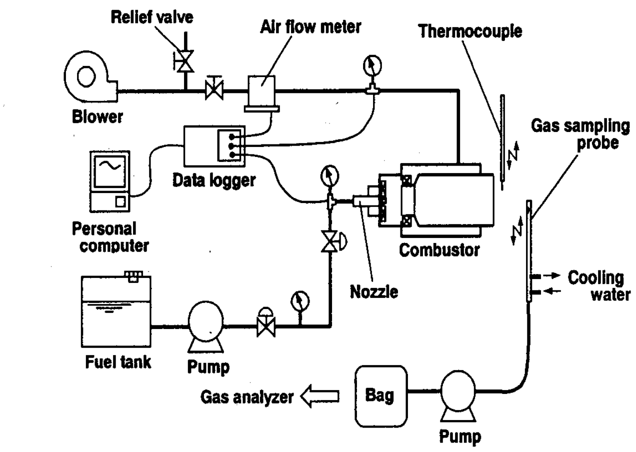


Fig. 1 Experimental setup

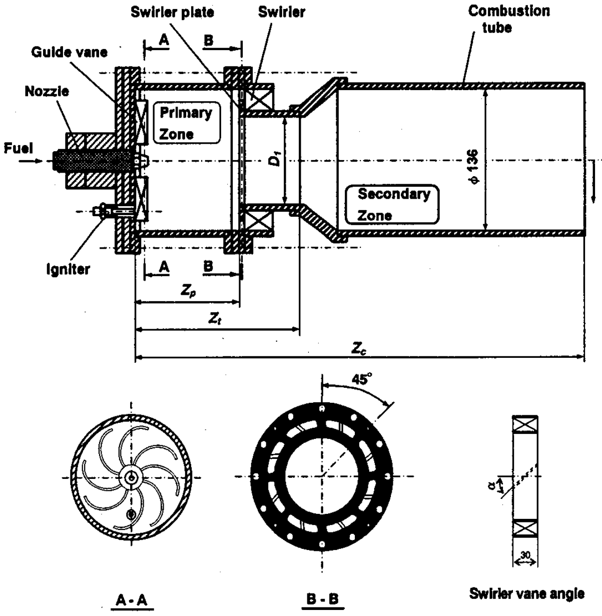


Fig. 2 Schematic of upward swirl combustor

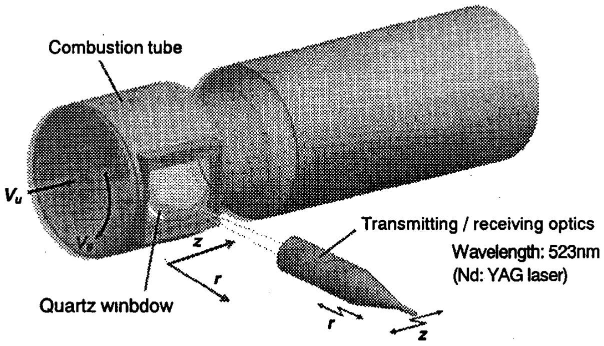


Fig. 3 LDA Measurement of gas velocity in the primary combustion zone

を検討するために，定格流量が 4.5Gallon/h と 6.0Gallon/h のノズルも使用した．

NII-Electronic Library Service

図3に一次燃焼領域内の速度分布計測の概略を示す．燃焼筒壁面の片側に石英ガラス窓を設置し，LDA の後方散乱式光学系プローブを用いてシード粒子からの散乱光を検出する．プローブを z 軸方向と r 軸方向に移動させ測定位置を変えながら，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]について測定を行い，一次燃焼領域内の速度分布を調べた．流速測定用のシード粒子には乾燥させた土粒を250μm 孔のふるいにかけブロア入口から吸入させた．

3. 実験結果および考察

3・1 燃料微粒化特性の影響　実験に使用する定格流量 3.0Gallon/h, 4.5Gallon/h, 6.0Gallon/h の3種類の燃料ノズルによる噴霧のザウタ平均粒径を測定した．図4に各ノズルのザウタ平均粒径の測定結果を示す．横軸は燃料圧力 P_f，縦軸はザウタ平均粒径である。いずれのノズルでも燃料圧力 P_fが高くなるとザウタ平均粒径が小さくなっている．これは，燃料圧力を増加させると，ノズルを噴出する燃料の流速が増加することで運動エネルギーが増加し，その結果微粒化が促進されることを示している．本実験の基準となる燃料流量 M_f = 4.3g/s の場合，ザウタ平均粒径は，3.0Gallon/h (P_f =2.7MPa) のノズルで 19.8μm，4.5Gallon/h (P_f=1.1MPa)では 28.8μm，6.0Gallon/h (P_f =0.6MPa)では 31.9μm であった．

次に3種類のノズルを用いた場合の安定燃焼範囲の測定結果を図5に示す．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．一次燃焼領域の空気過剰率λ_pはスワーラを通して一次燃焼領域に導入される空気流量と燃料流量から決定した．実線より下の範囲では火炎が安定しており，上の範囲では火炎が吹き

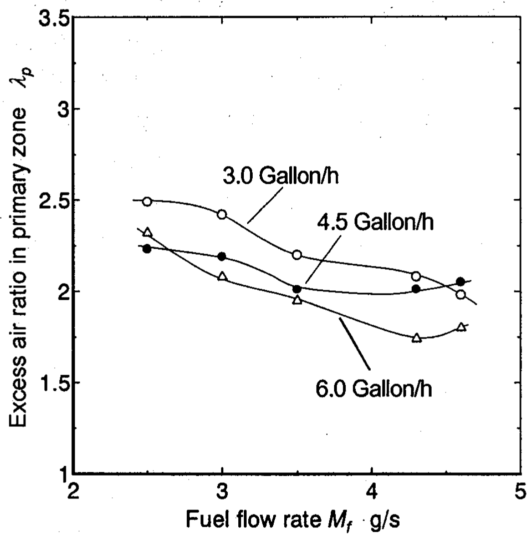


Fig. 5 Combustion characteristics on M_f - λ_p diagram

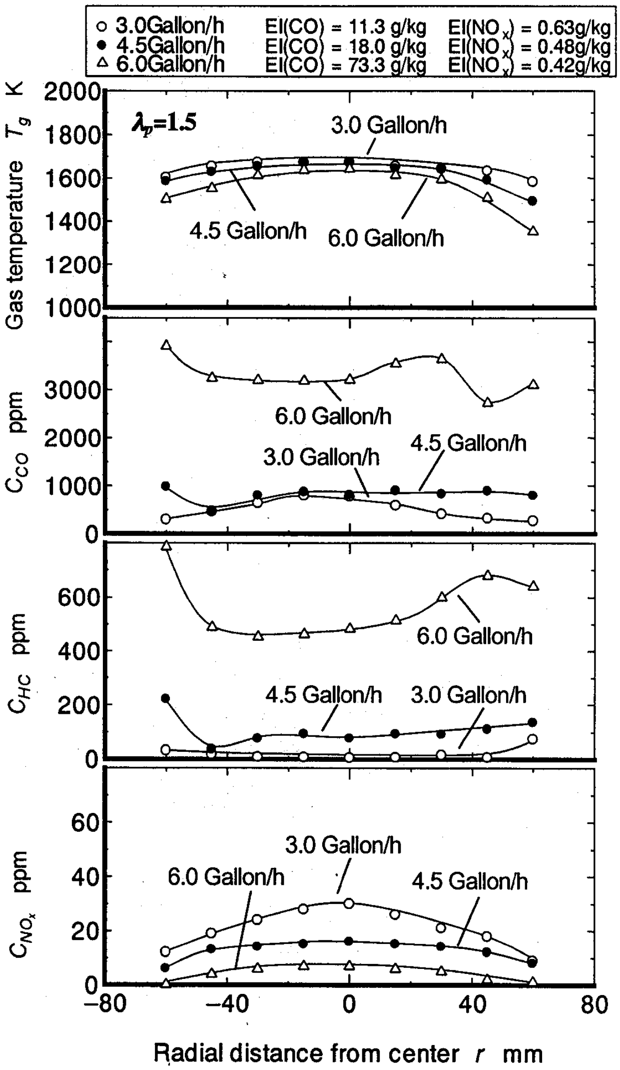


Fig. 6 Radial distributions of CO, HC and NOx concentrations and gas temperature

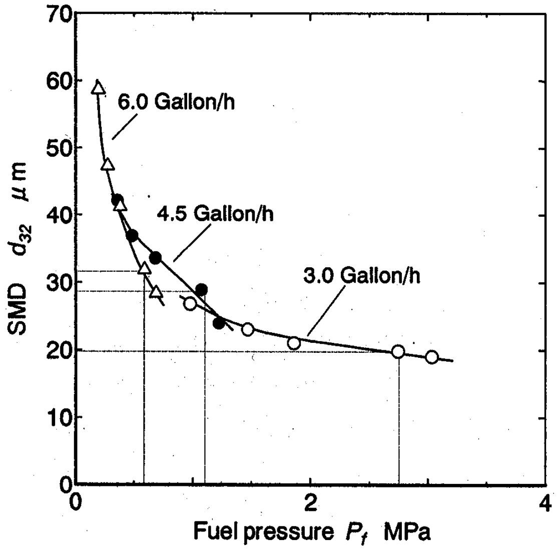


Fig. 4 Relation between P_f and SMD of fuel spray

The Japan Society of Mechanical Engineers
NII-Electronic Library Service

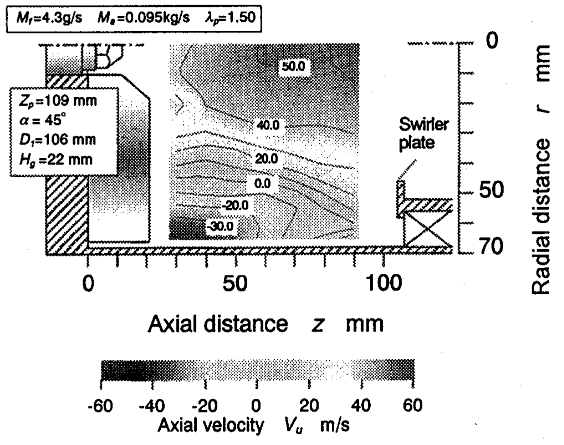
消えることを示す．

図からわかるように，3.0Gallon/h のノズルを用いた場合，吹き消えの空気過剰率が最も高く，広い安定燃焼範囲を示し，6.0Gallon/h の場合が最も狭くなった．これは，6.0Gallon/h の場合では，噴霧粒径が大きく，空気と燃料の混合が促進されていないことが原因であると考えられる．一方，3.0Gallon/h では，燃料の微粒化が良好で，噴霧粒径も他のノズルに比べ小さいことから，空気と燃料の混合が促進され，安定燃焼範囲も広くなったと考えられる．

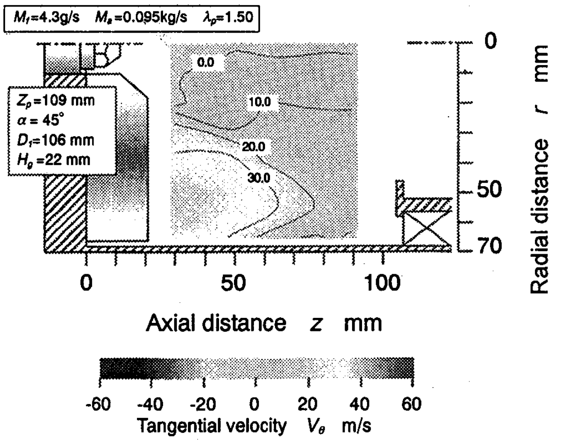
次に，一次燃焼領域の空気過剰率λ_pを 1.5，燃料流量M_fを 4.3g/s に固定し，燃焼器出口における半径方向の燃焼ガス温度分布と CO，HC および NOx 濃度分布を測定した．その結果を図 6 に示す．図中の CO 排出指数 EI(CO)，NOx 排出指数 EI(NOx)は半径方向の分布をもとに，流路面積の重みを掛けた平均化処理[19] した値をもとに算出した．

ノズルが 6.0Gallon/h の場合，未燃分が多く CO，HC の値が 3.0Gallon/h および 4.5Gallon/h の場合に比べて非常に大きくなっている．HC は最大で 787 ppm，CO は最大で 3910 ppm となっている．一方，NOx 濃度は低い値を示した．6.0Gallon/h の場合に石英ガラスライナーを用いて一次燃焼領域の火炎を観察してみると，一次燃焼領域には火炎が存在しておらず，主に二次燃焼領域での燃焼となっていた．従って燃焼領域が狭くなり，高温領域での燃焼ガスの滞在時間が短くなるため，NOx 生成量が増加しなかったものと推察される．燃焼器出口温度分布において 6.0Gallon/h の場合では，他の 2 条件に比べ壁面付近の温度が低くなっている．3.0Gallon/h と 4.5Gallon/h を比べてみると，CO の値は 3.0Gallon/h のノズルのほうが若干低い値を示している．また，3.0Gallon/h のノズルでは HC 濃度は非常に低い値を示した．以上の結果から，本燃焼器では一次燃焼領域で予混合的な燃焼となった場合に低 CO 化と低 HC 化が実現されると推察される．燃料の噴霧滴径が大きくなると燃料が蒸発しにくくなり，一次燃焼領域で予混合的な燃焼ができなくなると考えられる．

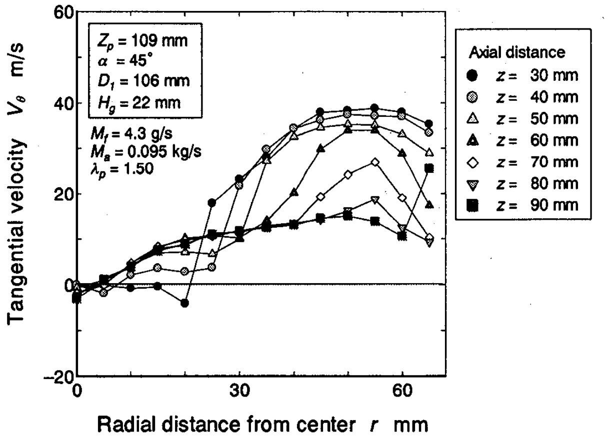
NOx については，燃料の噴霧滴径が小さくなるほど NOx 濃度が高くなった．滴径の大きな 6.0Gallon/h のノズルの場合に NOx 濃度が低い理由は先に述べたが，一次燃焼領域で予混合的な燃焼になっていると考えられる 3.0Gallon/h と 4.5Gallon/h のノズルの場合，滴径の小さい 3.0Gallon/h の場合の方が NOx 濃度が高いのは，燃料噴霧における単位時間当たりの蒸発量の違いで説明できる．滴径が小さいほど蒸発量が多いため，より量論比に近い予混合気となり，希薄な予混合気の燃焼と比較して燃焼温度が高くなる結果，NOx 生成量が多くなると推察される．従って，



(a) Axial velocity V_u



(b) Tangential velocity V_θ



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

Fig. 7 Flow velocity in primary zone (λ_p=1.5)

The Japan Society of Mechanical Engineers
NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

本燃焼器において低NOx化と低CO，低HC化を同時に実現するためには，適切な噴霧滴径のノズルを選択すべきであると言える．

3・2 一次燃焼領域における流速分布 一次燃焼領域における燃焼ガスの循環状況を調べるために，LDAを用いて一次燃焼領域における流速分布の測定を行なった．測定はすべて燃焼状態において行った．燃料流量 M_f=4.3g/s，一次燃焼領域の空気過剰率 λ_p=1.5の条件で，(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7に示す．(c)の図は横軸に半径方向の座標を取り縦軸に 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 分布では，0 m/sの等速度線を境に壁面側で底部に向かう流れが現れ，中心軸側で出口方向へ向かう流れが現れている．z=70 mm，r=65 mm付近においてガイドベーンに向かう速度が低下しているが，石英ガラス窓近傍の計測不能の部分に高速の流れがあると推定される．また，スワーラプレートの形状からくる空気流入口部分と遮閉部分（図2中のB-B断面より）の配置が原因であると考えられる．この位置よりガイドベーン側のz=40 mm，r=65 mm付近では再びガイドベーンに向かう速度が増加しており，空気がガイドベーンまで達していることがわかる．そして，ノズル近傍の速度が正となり出口側へ向かっていることから，燃焼筒底部に達した空気の流れがガイドベーンによりノズル方向へ向きを変え出口側へと転じていると考えられる．また，ガイドベーン近傍のr = 30 mmの位置ですでに速度が正となっているが，これはガイドベーンに沿う流れがノズルに到達する前に向きを転じていることを示している．一次燃焼領域出口付近の中心部では最も大きい値の53 m/sを示している．z=30 mm，r=20 mm付近では V_u が周囲より小さな領域が表れているが，これは，ガイドベーンにより中心軸に向かう流れと燃料噴霧が干渉する位置にあたり，よどみに類似した領域になっていると考えられる．ただし，本実験ではシード粒子からの散乱光と噴霧滴からの散乱光を区別してないため，噴霧滴速度の影響が表れていることは否定できない．

(b)の V_θ 分布では，ガイドベーンに近づくにしたがい壁面側での旋回速度が増加している．これもスワーラプレートの空気流入口部分と遮閉部分配置によるものと考えられるが，スワーラから導入された空気がガイドベーンに沿う流れに変化することで軸方向の運動量が旋回方向の運動量に変わることも影響していると考えられる．そのため(c)の V_θ 分布より，z=30 mmにおいて壁面からr = 40 mm付近まで高い値を示している．そのため(c) の V_θの半径方向分布より，z = 90 mm

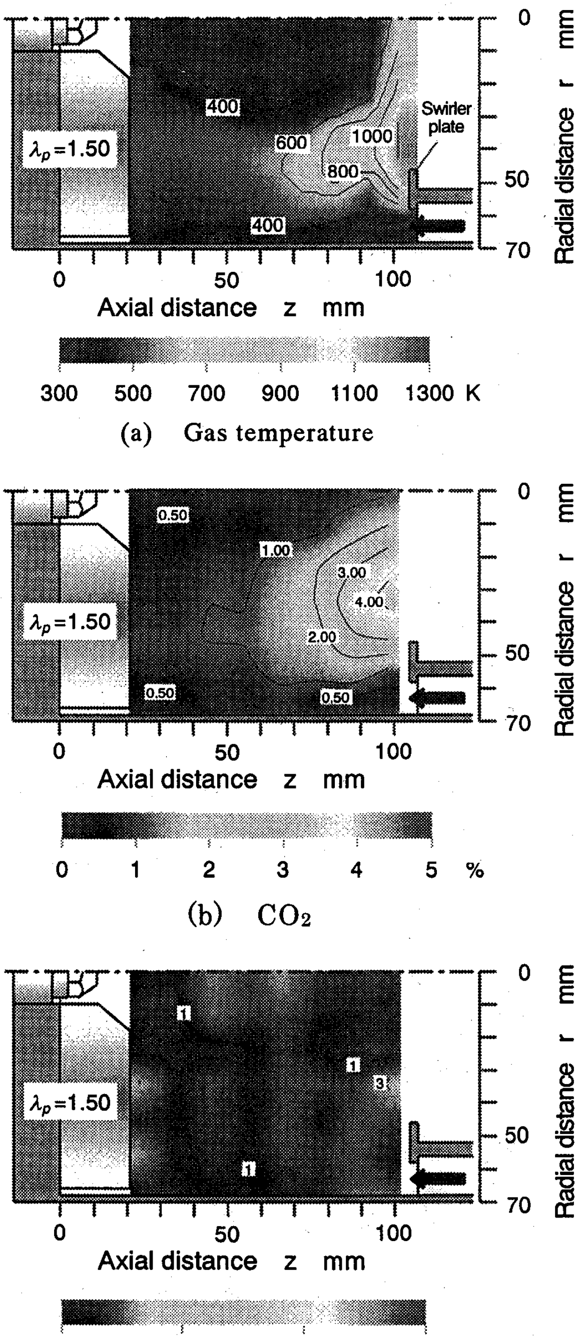


Fig. 8 Distributions of CO and NOx concentrations, and gas temperature in primary zone

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

での V_θ 分布は r=0〜50 mmの範囲で中心からの距離 r の増加に伴い単調に増加していることから，燃焼ガスは剛体的な渦（強制渦）を形成しながらスロート部へ向かっていることがわかる．

3・3　一次燃焼領域内における燃焼状況　一次燃焼領域内の速度分布と燃焼状況の関係について調査した．燃料流量 M_f = 4.3g/s，一次燃焼領域の空気過剰率 λ_p= 1.5 の条件で一次燃焼領域内での温度分布，燃焼ガス成分の濃度分布を測定した．その結果を図8に示す．(a)の温度分布では，スワーラプレート付近の中心軸寄りに1000K以上の高温領域が形成されている．また，400Kから800Kの領域が燃焼器上流に伸びているが，これは，図7の(a)の V_u の分布において示されているスワーラ出口からガイドベーンに向かい，ガイドベーンにより中心軸方向に向かう流れに対応していると考えられる．

(b)の CO_2 濃度分布では，ガイドベーン近傍における濃度が0.5%程度であるが，これは，スワーラからガイドベーンに向かう一次燃焼用空気の流れに燃焼したガスの一部が取り込まれていることを示している．(c)のNOx濃度分布では，一次燃焼領域内でほぼ一様である．(a)の温度分布を見ても，一次燃焼領域はほとんど1000K以下であり，燃焼ガスの一部が上流に遡上しても，NOxの生成には寄与しないことがわかる．

3・4　一次燃焼領域出口と燃焼器出口における温度やガス濃度の相関　燃料流量 M_f =4.3g/s，空気過剰率 λ_p=1.5 の条件で一次燃焼領域出口と燃焼器出口の燃焼ガス特性を測定し，両者の相互関係を調査した．一次燃焼領域出口の計測点は図2のB-B断面付近，燃焼器底部から95mmとした．これはスロート入口に相当する．

一次燃焼領域出口では中心部の温度が低く，燃焼器半径方向の r=±40mm付近の温度が高くなっている．これはスワーラプレート付近に火炎が保持されていることを示している．しかし，燃焼器出口では，一様な温度分布になっている．

COとHC濃度は，一次燃焼領域出口では温度分布に対応した分布となっているが，燃焼器出口では濃度が非常に低く一様な分布になっている．一方，NOx濃度は一次燃焼領域出口では一様な分布であるが，燃焼器出口では中心が高く壁面に近づくにつれ低くなっている．また，燃焼器出口の方が一次燃焼領域出口より高い値を示している．

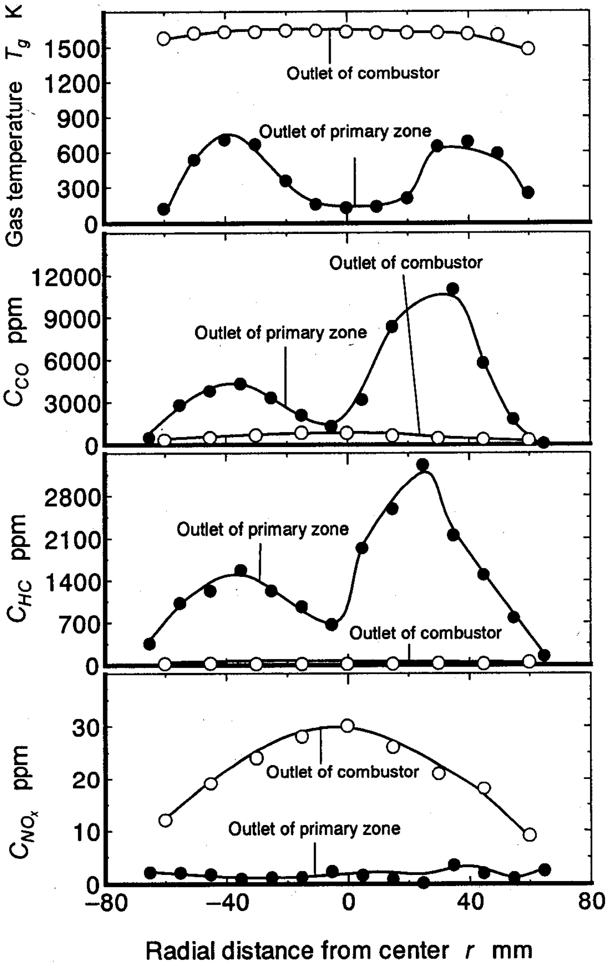


Fig. 9 Radial distributions of CO, HC and NOx concentrations and gas temperature

以上から，本燃焼器においては一次燃焼領域以降においても燃焼が継続しNOxが主に二次燃焼領域内で生成するとともに，二次燃焼領域内での混合が良好で，燃焼器出口では温度分布は平たんな分布となることがわかった．

4. 結　言

遡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，燃料噴霧の微粒化特性による変化が燃焼ガス特性，燃焼ガス温度分布といった燃焼状態におよぼす影響，および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) 燃料の微粒化が促進されると，一次燃焼領域において予混合的な燃焼が実現され，安定燃焼範囲が広くなるとともに，COとHCの排出量が低減される．一方，NOx排出量は微粒化の促進に伴い増加した．これは，噴霧滴径が小さくなり燃料の単位時間当たりの蒸発量が多くなることで，量論比に近い予混合気が形成されるために

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

燃焼温度が高くなり，その結果 NOx 生成量が増加したものと推察される.

(2) 一次燃焼領域内の速度分布計測により，壁面付近での遡上旋回流が確認され，さらに温度および CO_2 濃度分布から燃焼ガスの一部が流れに沿って遡上していることが確認された.

(3) 燃焼は二次燃焼領域内で継続し，NOx が生成されることがわかった．また二次燃焼領域内での燃焼ガスの混合は良好であることがわかった.

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) Itoh, T., An Intoroduction-Expected Microturbines, *Journal of the Gas Turbine Society of Japan,* Vol.31, No.5(2003), pp.289-294.

(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) Gradinger, 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) Arai, M., Flue Gas Recirculation for Low NOx Combustion System, *International Joint Power Generation Conference*, IJPGC-2000, CD-15073, (2000-7), pp.1-10.

(11) Shinkawa, T. and Arai, M., Characteristics of NO Emission from Spray Combustion with Internal EGR, *International Joint Power Generation Conference*, IJPGC-2001/FACT, CD-19105, (2001-6), pp.1-7.

(12) Arai, M. , Effectiveness of Internal EGR for Swirl-type Combustor, *Journal of the Society of Chemical Engineers Japan*, Vol.28, No.6(2002), pp.686-692.

(13) Katsuki, M. and Hasegawa, T., The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air, *27th International Symposium on Combustion*, (1998-8), pp.3135-3146.

(14) Akinyemi, O., Toqan, M .A., Beer , J.M., Syska, A., Thijsson, J. and Benson, C. and Moreland, D., Development of a high-air preheat low NOx burner: experimental studies aided by computational modeling, *Journal of the Institute of Energy*, Vol.75(2002), pp.52-58.

(15) Arai, M. and Hiroyasu, H., Nonluminous Spray Combustion in a Jet-Mixing-Type Combustor, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.34, No.4(1991), pp.540-547.

(16) Cha, M.C., Finite-Rate Mixing Effects in Reburning, *27th International Symposium on combustion*, (1998-8), pp.1427-1434.

(17) Vahdati, M. and O' Nions, P., Design and development of a low NOx colander ejector burner, *Journal of the Institute of Energy*, Vol.73(2000), pp.12-17.

(18) Hayashi, S. and Yamada, H., NOx Emissions in Combustion of Lean Premixed Mixtures Injected into

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

Gas Burned, *28th International Symposium on Combustion*, (2000-8), pp.2443-2449.

(19) Yotoriyama, K., Amano, S., Fujiwara, H., Furuhata, 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.

NII-Electronic Library Service