

天然ガス希薄予混合低エミッション燃焼器の研究

Research of Natural Gas Ultra Low Emission Combustor

山 崎 敦*

Atsushi YAMAZAKI

井 上 勉*

Tsutomu INOUE

黒 川 正 敏*

Masatoshi KUROKAWA

村 上 尚*

Hisashi MURAKAMI

要 旨

希薄予混合燃焼器のミキサとして、多数のベンチュリミキサを分散配置したマルチベンチュリを採用し、空気と天然ガスの均質混合と自己着火回避の両立を可能とした。また、このベンチュリミキサの特性を利用することにより、高精度燃焼状態検知手法を確立し、低エミッション予混合燃焼範囲を拡大できた。これにより、マイクロガスタービン発電機搭載上で、50%から100%負荷にてNO_x, CO, THC: 3 ppm@15%O₂ 以下の低エミッションを実証した。

ABSTRACT

A homogeneous mixing and autoignition prevention of air and natural gas has been simultaneously obtained adopting a multi-venturi composed with a number of dispersely arranged venturi mixers set up as a premixed lean burn combustor. By applying the characteristics of the venturi mixers, a high accuracy prehension of the state of combustion was enabled, and the enlargement of the premixed combustion range was achieved. The combustor system above was installed on a micro-gas turbine, achieving an ultra low emission level of 3ppm (at 15 percent oxygen equivalent) NO_x, CO and THC at 50 to 100 percent load.

1. まえがき

地域分散型エネルギーの一つとして注目されているマイクロガスタービン発電機は、環境保全の観点から大容量発電プラント並のエミッション性能が求められている。ガスタービンのエミッションを低減させる有効な方法として、均質な予混合気を比較的低温で燃焼させる希薄予混合燃焼方式がある。しかしながら、均質な予混合気の生成と混合過程での自己着火回避の両立が困難であるとともに、希薄な予混合気は燃焼効率の低下や燃焼振動などの不安定燃焼を起こしやすいため、大容量発電所並みの低エミッションを実現することが困難とされてきた^{(1)~(4)}。

特にマイクロガスタービン発電機への適用に際しては、失火の回避と広い低エミッション運転範囲を確保するために、運転状況によって変化する燃焼状態を高精度に把握し、適切に拡散燃焼と予混合燃焼を切り換える手段(燃焼制御手法)をシンプルな手法で実現することが必要とされている^{(2), (3)}。

本研究は、環境にやさしい低エミッションのマイクロガスタービン発電機をコンセプトに、従来困難とされてきた希薄予混合燃焼器を実用化することを狙いとした。

2. 予混合燃焼器

2.1. エミッション目標値

本燃焼器はマイクロガスタービン発電機に適用されるため、NO_x 排出量の目標値を Fig. 1 に示す原子力発電を含む全発電所平均を下まわる、3ppm@15%O₂以下とした。また、CO 及び THC については、NO_x と同等の排出量を目標値とした。

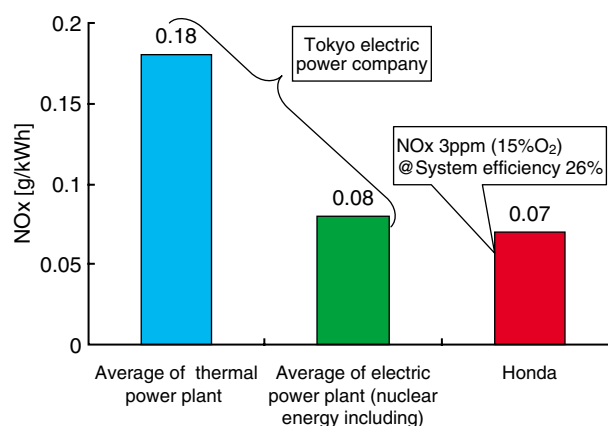


Fig. 1 NO_x emission of electric power plant⁽⁵⁾

さらに上記エミッション値を、マイクロガスタービン発電機の常用運転範囲である 50% から 100% 負荷範囲で、実証することを目指した(希薄予混合燃焼適用範囲)⁽⁶⁾。

希薄予混合燃焼方式では、一般的に混合気の濃度分布を均一化することにより、低エミッション燃焼となる断熱火炎温度(以下 T_{ad})範囲を拡大できることがわかっている。基礎的な先行燃焼試験の結果(Fig. 2)より燃焼器単体での目標値を以下の通り設定した。

1. 予混合気混合度

不均一率: $\pm 10\%$ 以下

(低エミッション燃焼 T_{ad} 幅: 200°C)

2. 燃焼状態推定精度

T_{ad} 演算推定誤差: $\pm 25^{\circ}\text{C}$ 以下

(燃焼用空気流量推定精度: $\pm 5\%$ 以下に相当)

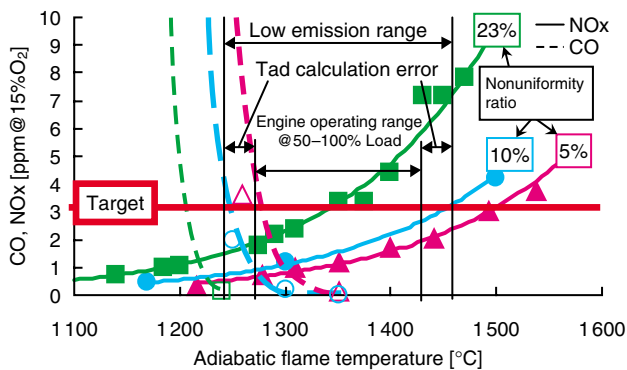


Fig. 2 Effect of adiabatic flame temperature on NO_x , CO emissions

2.2. 予混合ミキサ

予混合ミキサには、予混合気の均質化と燃焼用空気流量を把握するために、高い混合性能と通過空気流量の推定が可能となるベンチュリミキサを採用した。さらに、混合過程での自己着火回避とコンパクト化を狙いとして、Fig. 3に示すように小型のベンチュリミキサを分散配置した構造のマルチベンチュリミキサとした。また、保炎性を確保するためのスワラは、各ベンチュリディフューザ部で混合された予混合気を転向させて旋回流を形成するパイプスワラとした。

3. ベンチュリミキサ

3.1. ベンチュリミキサ内の混合状態解析

CFD を用いた、ベンチュリミキサディフューザ部での、空気と CH_4 の濃度分布の計算結果を Fig. 4、計算時の境界条件(マイクロガスタービン発電機定格運転相当)を Table 1 に示す。Fig. 4の濃度分布の計算結果よりディフューザ部の広がり角度(減速率)の大きい方が混合距離は短くなることがわかる。ただし、ディフューザ部の広がり角度を広くし過

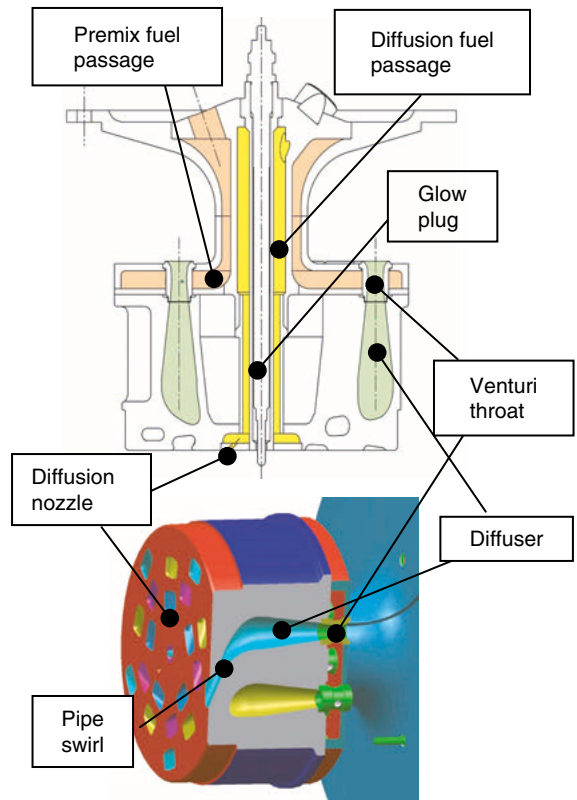


Fig. 3 Layout of multi venturi mixer

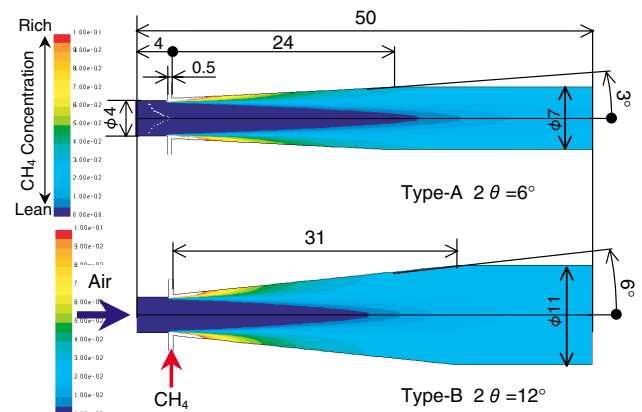


Fig. 4 Calculation results of CH_4 concentration

Table 1 Boundary conditions for calculation of CH_4 concentration

	Velocity [m/s]	Temperature [K]	Pressure [kPaA]
Air in	100	873	—
CH_4 in	2.2	473	—
Outlet	—	873	400

ぎると剥離が発生するために、自己着火の原因となる混合気の滞留が起きる。よって、広がり角度は剥離が発生しない最も広い角度である 12° とした。

3.2. シングルベンチュリ単体試験

CFDの計算結果を基にシングルベンチュリミキサを作成して、混合状態の解析と燃料噴出方法の最適化を行った。

3.2.1. 単体試験装置

Fig. 5 にシングルベンチュリ単体試験装置を示す。空気と燃料(CH_4)は、任意に流量調節されたのち、試験装置に供給される。混合気は、ディフューザ部の下流側に設置されたサンプルプローブにより採取され、 CH_4 濃度を測定する。

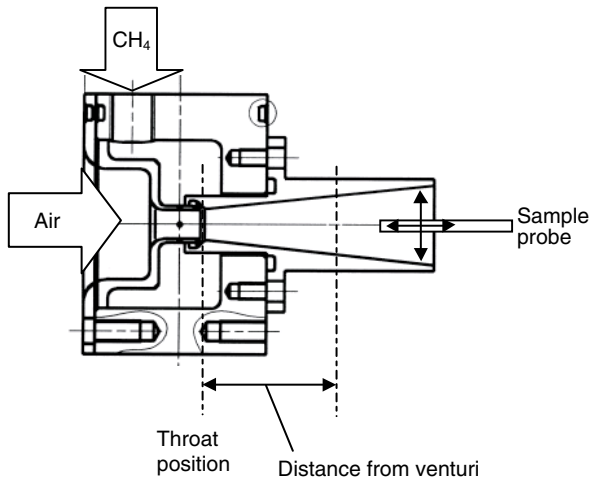


Fig. 5 Cross-sectional view of single venturi mixer

3.2.2. ディフューザ部広がり角度とスロート部通過流速の不均一率への影響

スロート部からの任意距離における断面にて不均一率を測定した結果を Fig. 6 に示す。不均一率の定義は任意距離の断面における局所濃度の標準偏差を平均濃度で除した値とした。CFDの結果と同様に、ディフューザ部の広がり角度(減速率)の大きい方が混合距離は短くなり、目標不均一率を、広がり角度 12° (TYPE-B)にて、ベンチュリスロート部より 28mm(混合距離/スロート径: $L/D=7$)の距離で得られることがわかった。

また、Fig. 7 にベンチュリを通過する空気流速が異なる場合の不均一率を示すが、通過流速の差が混合距離に与える影響は少ない。

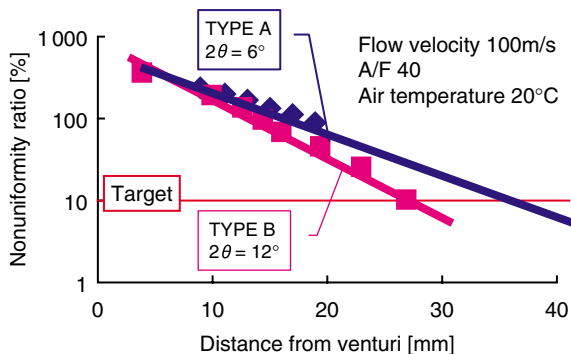


Fig. 6 Effect of diffuser angle on nonuniformity ratio

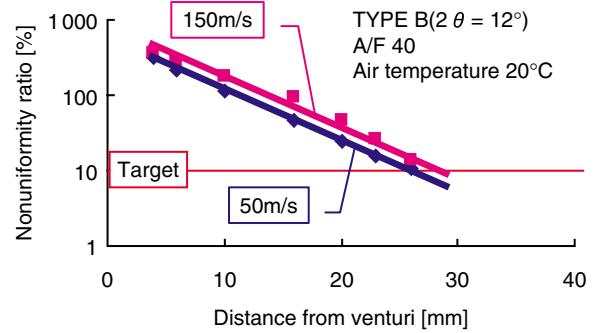


Fig. 7 Effect of velocity on nonuniformity ratio

3.2.3. 燃料噴出方法の不均一率への影響

燃料噴出方法が不均一率へ与える影響を調べるために、Fig. 8に示す3タイプの燃料噴出方法にて、スロート下流での混合状態の可視化と不均一率の測定を行い最適化を図った。ベンチュリスロート部直後と 20mm 後流での混合状態を Fig. 9 に示す。なお、可視化に際しては、オイルスモークをシードとして燃料側に供給し、レーザシート光を光源として撮影を行った。旋回を与えられた燃料が、スリットからスロート部の空気流へ噴出する Base Type の場合、燃料が全体に拡散しないのは、燃料が遠心力によって外周壁面に貼り付くためと考えられる。スロート部中心に向かって燃料を噴出する Two holes の場合、燃料が壁面に貼り付くことなく適度に空気流中に貫通し、混合が促進される。

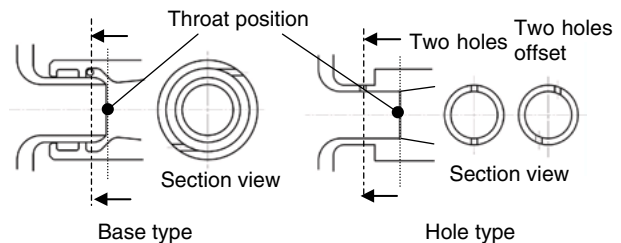


Fig. 8 Cross-sectional view of fuel supply shape

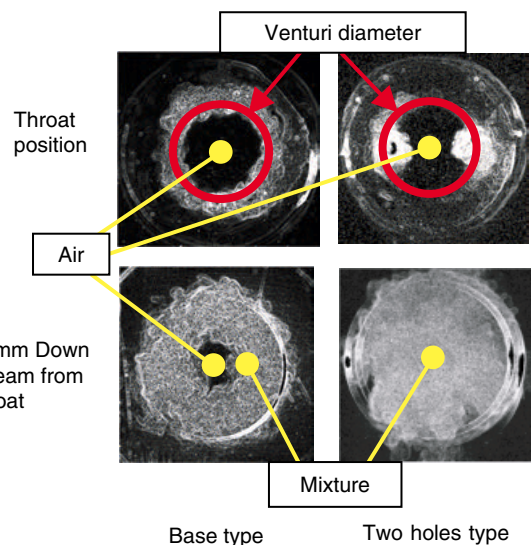


Fig. 9 Comparison of mixture distribution for two different fuel supply shapes

ディフューザ部出口での不均一率をFig. 10に示す。噴孔をオフセットさせることによって、均一に混合されていることが確認できる。これは、オフセットすることによってスロート壁面近傍の周方向に燃料が分散したためであると考えられる。よって、より短い距離で混合させるためには、スロート壁面近傍に分散するように燃料を噴出するHoleType + オフセットが有効である。

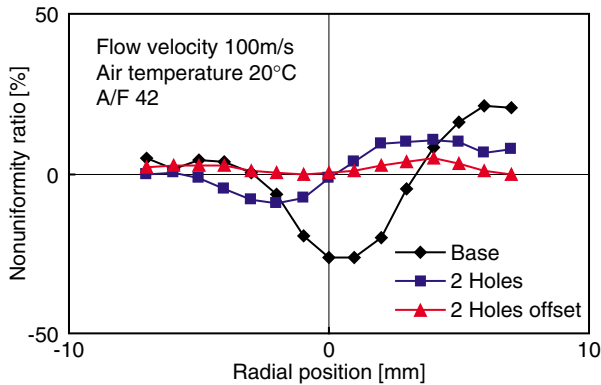


Fig. 10 Effect of fuel supply shape on nonuniformity ratio

3.3. マルチベンチュリミキサ

3.3.1. ベンチュリミキサ間の混合比同調

Fig. 3 に示した実機搭載用のマルチベンチュリミキサでは、燃焼時の燃焼筒内圧力分布やディフューザ部の形状誤差等により、各ベンチュリミキサを通過する空気流量にばらつきが生じる可能性がある。それに伴い各ベンチュリミキサの混合比もばらつき、結果的に燃焼筒内での混合気濃度分布もばらついてしまう。したがって各ベンチュリミキサでの混合比同調を取るために、以下の手法を用いた。

Fig. 11 より、燃料入り口全圧： P_{f0} と空気入り口全圧： P_{a0} を等しくすると、(燃料スロート静圧： P_{f1} = 空気スロート静圧： P_{a1} なので)燃料有効開口面積： F_f と空気有効開口面積： F_a を通過する流速が等しいために、有効開口面積比： F_a/F_f = 質量流量比： m_a/m_f となる。

実際の使用条件下では燃料と空気の物性(密度・比熱比)が近いので、 P_{f0} と P_{a0} を等しくすると F_a/F_f と m_a/m_f がほぼ等しくなる。このことより、ベンチュリ後流の影響で空気質量流量が変化しても、 P_{f0} と P_{a0} が一定であれば m_a/m_f が一定となることがわかる。これを応用することにより、マルチベンチュリミキサの F_a/F_f を要求する空燃比:A/F付近に設定することで、各ミキサ間でのA/Fばらつきを抑えることが可能となる。

有効開口面積比を 40 に設定したベンチュリミキサを用いて、燃料と空気の入り口圧力を一定状態に保ち、出口圧力を変化させることでベンチュリミキサを通過する空気流量が変化したときの、設定した A/F に対する誤差を Fig. 12 に示す。設定した有効開口面積付近の A/F では、空気流量

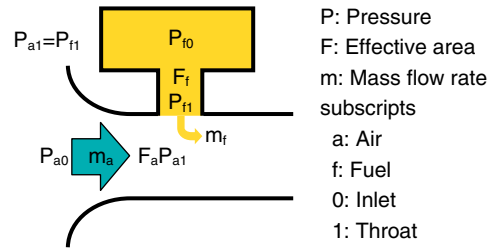


Fig. 11 Model of venturi mixer

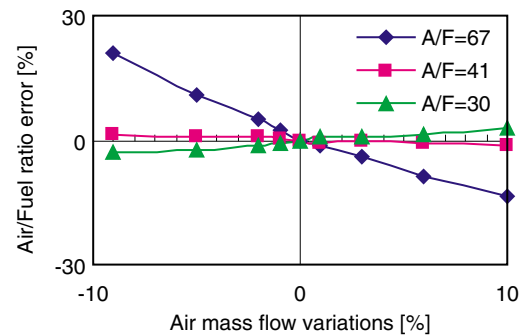


Fig. 12 Effect of air mass flow variations on air/fuel ratio error

変化に対しての A/F 誤差は少なくなることがわかる。このことから、マルチベンチュリミキサにおいて各ベンチュリミキサを通過する空気流量が変化しても、各ベンチュリミキサ間の A/F ばらつきは抑制できることがわかる。

3.3.2. マルチベンチュリミキサの不均一率

実機搭載用マルチベンチュリミキサにて、予混合気の不均一率を確認するため、ミキサ出口断面(燃焼筒入り口断面)での不均一率を測定した結果を Fig. 13 に示す。不均一率は、ミキサ出口断面積の 95%以上で±5%以下となり、目標である±10%以下を十分達成した。したがってベンチュリミキサを複数配置しても、各ベンチュリ間で混合比の同調が取れることにより、燃焼筒内にて均質な予混合気形成が可能であることが確認できた。

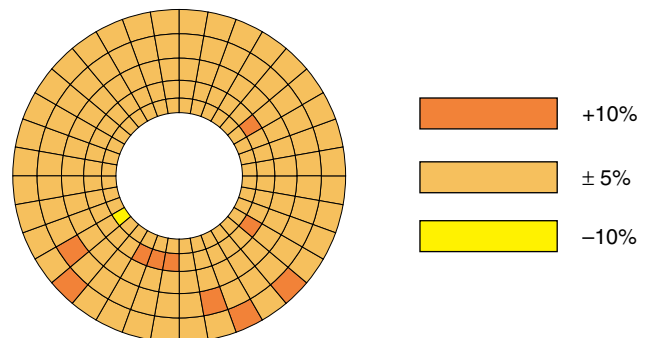


Fig. 13 Nonuniformity ratio at the outlet of multi venturi mixer

4. 状態検知

4.1. 燃焼状態検知手法

マイクロガスタービン発電機負荷 50%から 100%にて、3 ppm以下のエミッション性能を確保することと、燃焼切換を失火することなく実現するために、燃焼器内の T_{ad} をリアルタイムに把握する必要がある。 T_{ad} の推定に必要なパラメータを Fig. 14 に示す。

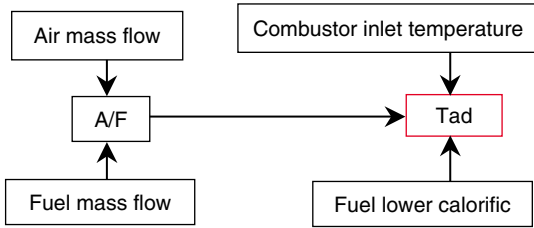


Fig. 14 Parameters for estimation of T_{ad}

本マルチベンチュリミキサでは、通過する空気が燃焼用空気となるため、空気流量の推定をベンチュリミキサのベンチュリ特性を利用して求めることとした。ベンチュリの式を式(1)のように変形すると、入口及びスロートの圧力項と有効開口面積が入ったベンチュリ流量特性を表す項の大きく二つに分けられる。流量特性(有効開口面積)は、流速や粘性の影響を受け変化してしまうため、空気流量をベンチュリミキサに供給する燃料流量と燃料圧力で表す Map として、ベンチュリ入口条件と燃料流量、燃料圧力の計測結果から空気流量を求める検討を行った。

$$Ga^* = F \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{1}{\sqrt{R}}} \sqrt{\left(\frac{P_s}{P_{in}}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_s}{P_{in}}\right)^{\kappa+1/\kappa}} \quad (1)$$

Flow characteristic term Pressure term

Ga^* : Corrected Air mass flow, F : Effective area, P : Pressure
 κ : Specific heat ratio, T : Temperature, R : gas constant
 Subscripts in: Inlet, s: Throat

ベンチュリミキサの校正試験結果を基に、流量特性の変化を含んだ状態の流量を、標準状態(15°C, 1気圧)に換算した修正空気流量: Ga^* で表すと、Fig. 15 に示すように入口条件が異なっても、圧力項の値に対する流量特性がほぼ一定で変化しない。このことから、入りの圧力とスロート圧力を基に空気流量を求めることが可能となる。ただし実機上では、スロート圧力の計測が困難であるため、燃料流量と燃料圧力を標準状態に補正した修正燃料流量: Gf^* , 修正燃料圧力: Pf^* として、入口条件の異なる Ga^* を表すとほぼ同一の傾きを持つことが示された(Fig. 16)。

これらのことから校正試験で得られた Gf^* , Pf^* , Ga^* を

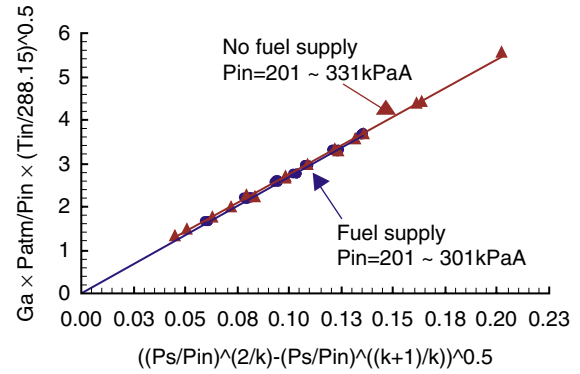


Fig. 15 Venturi flow characteristic

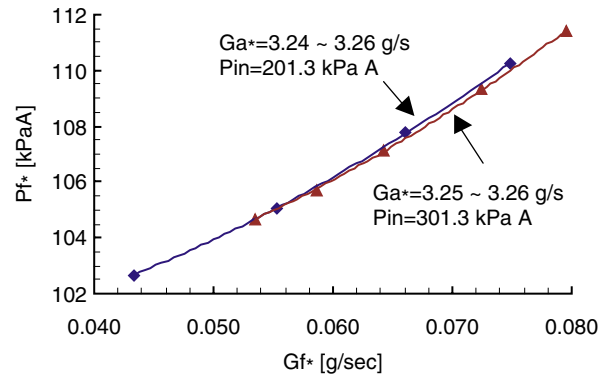


Fig. 16 Venturi flow characteristic

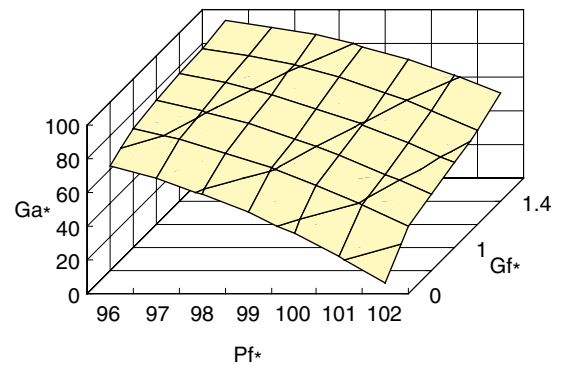


Fig. 17 Air mass flow map

三次元 Map (Fig. 17) とすることで、異なる入口条件での空気流量を求めることが可能である。 Map の特徴としては、燃料流量一定で空気流量を減少させた場合、ベンチュリ特性によりスロート部の静圧が上がるため燃料供給圧力も上がり、一般に右肩下がりのグラフとなる。

4.2. 状態検知精度

4.2.1. 燃焼空気流量の演算精度

空気流量演算精度の確認をするため、供給される空気の全量が燃焼空気となるようにした状態にて、燃焼試験を実施した結果を Fig. 18 に示す。演算の誤差は拡散燃焼の低流量域を除きほぼ $\pm 5\%$ 以下であり、実用上問題ないことを確認した。低流量域で計量精度が低下する要因は、圧力及び温度センサーの精度によるものと考えられる。

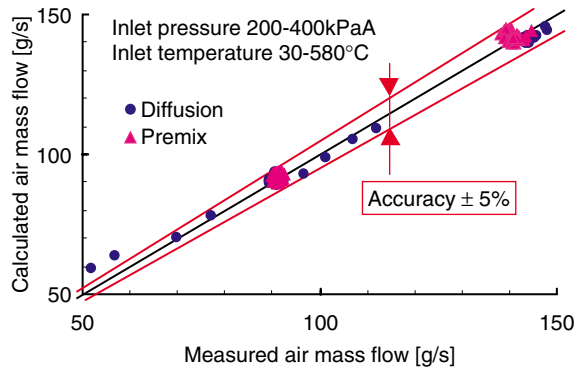
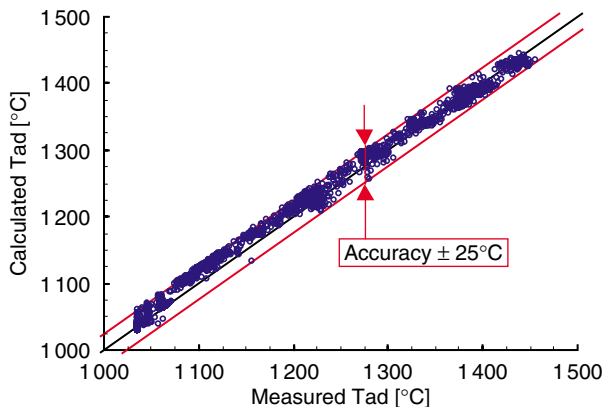


Fig. 18 Accuracy of calculated air mass flow

4.2.2. 断熱火炎温度の演算精度

断熱火炎温度(T_{ad})は、A/F、燃焼器入口空気温度、燃料温度、燃料低位発熱量及び燃焼前と燃焼後のガスのエンタルピーを用い算出する。しかし、実機制御演算上回帰計算は避けるべき手法である。また計算を簡略化するためにMapを用いて演算することとした。燃焼空気流量演算精度の確認試験を基に、 T_{ad} の演算を行った結果をFig. 19に示す。演算誤差は、Mapを用いても悪化することなく、目標の $\pm 25^{\circ}\text{C}$ の範囲内に収まっていることが確認できた。

Fig. 19 Accuracy of calculated T_{ad}

5. 燃焼試験

マルチベンチュリミキサによる均質な予混合気生成及び、 T_{ad} 推定による燃焼状態検知手法を確立したため、燃焼試験装置にて燃焼性能及び実用性能評価を行った。

5.1. 燃焼試験装置

実機用燃焼試験に用いた試験装置をFig. 20に示す。空気は、圧縮機で昇圧され流量調節弁及び加熱ヒータによって所定の流量と温度に調整されたのち、燃焼試験装置へ供給される。また、圧力は燃焼試験装置下流に設けた圧力調整弁によって調整される。燃料(天然ガス, 13A相当: $\text{CH}_4=88.5\%$, $\text{C}_2\text{H}_6=4.6\%$, $\text{C}_3\text{H}_8=5.4\%$, $\text{C}_4\text{H}_{10}=1.5\%$)は、燃料圧縮機

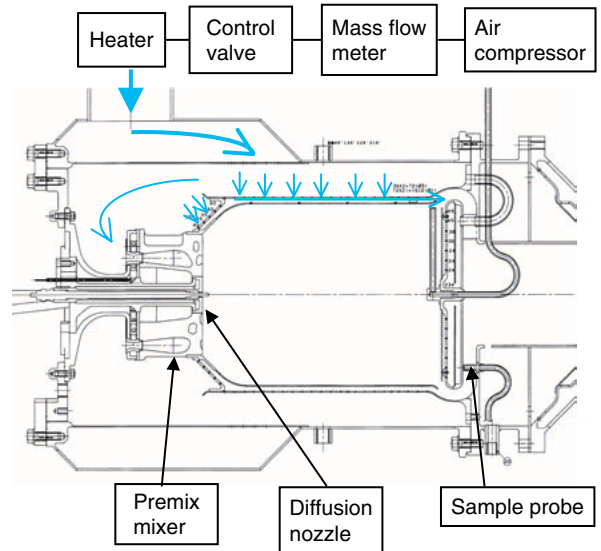
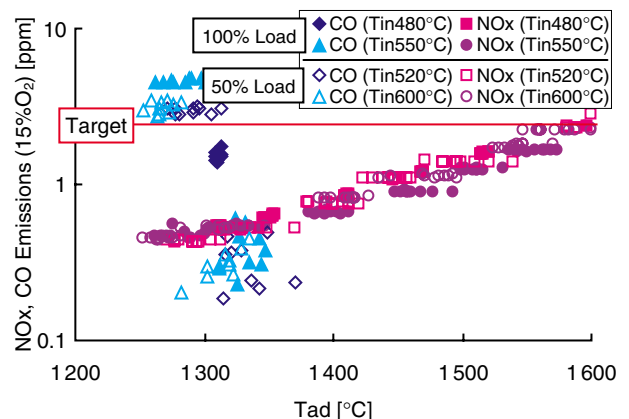


Fig. 20 Cross-sectional view of combustor rig

で昇圧後、拡散及び予混合用にそれぞれ独立した燃料制御弁によって、流量制御を行い燃焼試験装置に供給される。燃焼ガスは、燃焼筒を冷却した希釈空気と混合され、排気通路内に設けられたサンプルプローブにより採取される。なお、燃焼ガス成分の濃度に応じて、分解能の異なる2台の分析計を使用して分析を行っている。

5.2. 予混合燃焼性能

マイクロガスタービン発電機の負荷条件50%と100%相当での空気流量と圧力条件にて、燃焼器入口空気温度: T_{in} と T_{ad} をパラメータに燃焼試験を実施した結果をFig. 21に示す。なお T_{in} は実機条件相当の 420°C から 600°C に設定して試験を行った。予混合燃焼時の低エミッション燃焼範囲は、 T_{ad} で 250°C 確保され目標の 200°C を満足する結果を得られた。これはFig. 13に示したように、ミキサ出口にて断面積の95%以上で不均一率が $\pm 5\%$ 以下となったことで、燃焼火炎全体の温度分布が均一化されたためと考える。また、予混合燃焼で懸念されていた振動燃焼や自己着火の発生はなく、安定した燃焼が得られた。

Fig. 21 Effect of T_{ad} and inlet temperature on NOx, CO emissions

5.3. 拡散燃焼と予混合燃焼の切り替え

Fig. 21 に示したように CO 濃度が 3 ppm を超える点は、 T_{in} により異なるもののおおむね $T_{ad}=1300^{\circ}\text{C}$ 付近という結果が得られた。このことから切換試験時の条件を Table 2 のように設定した。拡散→予混合と予混合→拡散で条件が異なるのは以下の 2 点を考慮したためである。

- ・ T_{ad} の演算誤差 $\pm 25^{\circ}\text{C}$
- ・ 温度のばらつきによる不必要な切換の回避

燃焼状態の切換は、 T_{ad} の演算値と T_{in} が Table 2 のしきい値を越えた時に行う。しかしながら、拡散用燃料と予混合用燃料では燃料流路が異なるために、配管・燃料通路の容積等により、燃料圧力、温度が安定するまでに時間遅れが生じる。その結果燃焼が不安定になり、条件によっては失火につながる。これを避けるために、拡散燃焼では 0.3g/sec (A/F400 相当) でも燃焼が可能ことから、切換時には供給燃料の総量を守りながら、拡散燃料流量は 0.3g/sec、残りを予混合燃料流量とする配分比にて、燃料を両方の燃料通路へ供給する時間を設け、段階的に切り換えを行うこととした。切換試験を行った結果を Fig. 22 に示す。双方(拡散から予混合、予混合から拡散)への燃焼切換え時に、失火することなく安定した切換を確認した。この結果より、実機マイクロガスタービン発電機を安定して運転できる見通しを得た。

Table 2 Set value for switching conditions

	Diffusion → Premix	Premix → Diffusion
T_{in} [$^{\circ}\text{C}$]	520	480
T_{ad} [$^{\circ}\text{C}$]	1350	1300

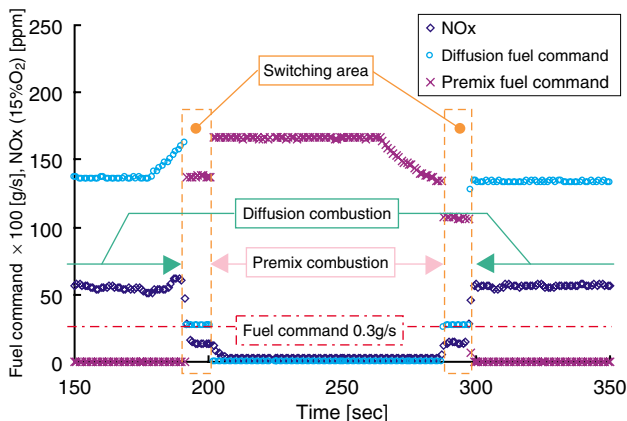


Fig. 22 Switching test results

5.4. 燃焼火炎観察

Fig. 23 に燃焼試験装置後方より拡散及び予混合燃焼切換前後での燃焼観察を行った写真を示す。予混合燃焼時には通常の燃焼で見られる火炎(輝炎・青炎など)は全く観察されず、非常に理想的な希薄予混合燃焼が実現できたことがわかる。

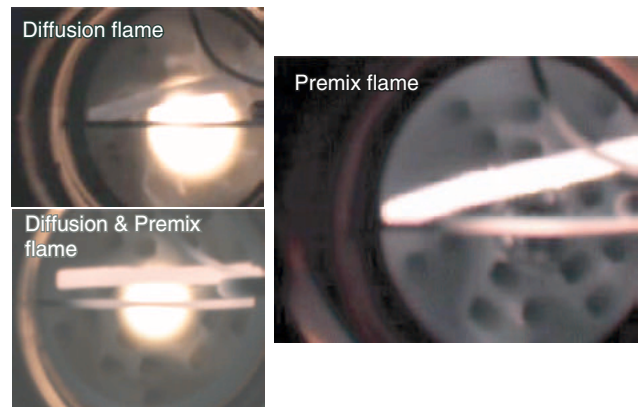


Fig. 23 Combustion flame pictures

6. マイクロガスタービン発電機実機試験

Fig. 24 に、マイクロガスタービン発電機搭載上にて、着火から 100% 負荷まで負荷を段階的に変化させたときの運転結果を示す。エンジン負荷が上昇し、燃焼切換条件の 50% 負荷 (22.5kW) 付近にて拡散燃焼から予混合燃焼に切換わり NO_x が急激に低下している。この時エンジン回転変動は 1% 以下であり、安定して運転を行うことができた。また、Fig. 25 に示すようにエンジン負荷 50% から 100% の運転範囲内にて、目標値であるエミッション (NO_x, CO, THC) 3ppm@15%O₂ 以下での運転を確認した^{(6), (7)}。

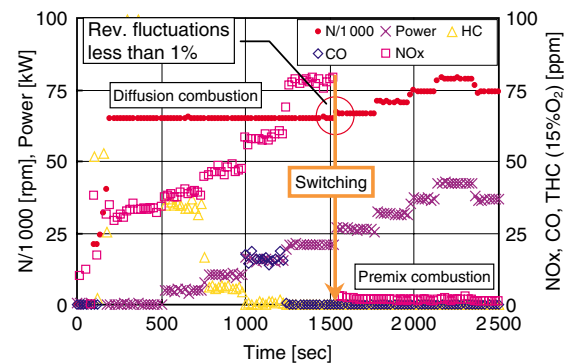


Fig. 24 Engine operation split chart

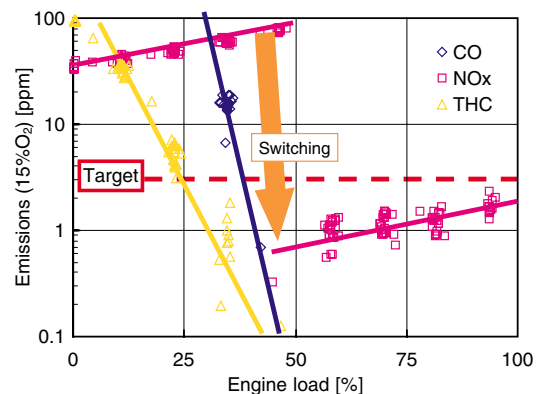


Fig. 25 Emissions characteristics of engine test at engine inlet temperature 10°C

7. まとめ

マイクロガスタービン発電機用の天然ガス希薄予混合低エミッション燃焼器に、マルチベンチュリミキサを採用し、単体試験と実機エンジン試験を行った結果、次の知見を得た。

- (1) 予混合ミキサにベンチュリミキサを適用し、ミキサ形状及び燃料噴出方法の最適化を行うことで、コンパクトかつ均質な混合気を生成できる予混合ミキサを確立した。この結果、広い低エミッション燃焼範囲と自己着火タフネスを両立する、天然ガス希薄予混合低エミッション燃焼器を実証した。
- (2) 予混合ミキサのベンチュリ特性を利用する事で、複雑なデバイスを必要としない高精度な燃焼制御手法を構築した。
- (3) この燃焼器を、マイクロガスタービン発電機に搭載し、常用運転範囲である 50%から 100%負荷においてエミッション値 3 ppm 以下(NO_x , CO, $\text{THC}@15\%\text{O}_2$)を実証した。
- (4) 本研究成果より、低エミッションマイクロガスタービン発電機の実用化の見通しがついた。

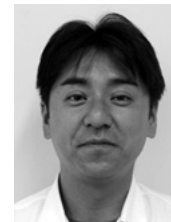
8. 参考文献

- (1) 藤 秀実, 渡辺 猛, 細井 潤: ガスタービン用燃焼器の研究開発, 石川島播磨技報第 34 巻第 3 号, p.181-185 (1994)
- (2) 梶田 真市, 大賀 信一, 緒方 正裕, 位高 訓, 北嶋 潤一, 木村 武清, 奥戸 淳: 1500kw 級ガスタービン用ドライ低 NO_x 燃焼器の開発, 川崎重工技報 128 号, p.25-30 (1996)
- (3) 藤森 俊郎, 斎藤 司, 水谷 琢, 藤 秀実: 高温高圧下での予蒸発予混合ガスタービン低 NO_x 燃焼技術の開発, 石川島播磨技報 2000 Vol.40 No.3, p.83-87 (2000)
- (4) 萬代 重実, 稲田 満, 福江 一郎, 谷村 聡: 高温ガスタービンの低 NO_x 燃焼器の研究, 三菱重工技報 Vol.31 No.4, p.243-246 (1994)
- (5) TEPCO(東京電力): 環境行動レポート 2002, p.113 (2002)
- (6) 新村 光一, 山口 浩司, 都築 貞親, 木村 英海, 加藤 武士: マイクロガスタービン発電機の研究, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.2, p.7-16 (2003)
- (7) Koichi Shinmura: Microturbine Research at Honda, Presented in 2003 ASME TURBO EXPO Panel session (2003)

■ 著 者 ■



山 崎 敦



黒川正敏



井上 勉



村 上 尚