

平成22年 4月19日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360383
 研究課題名（和文） ウルトラマイクロガスタービン用高負荷極超小型プロパン燃焼器の研究開発
 研究課題名（英文） Development of C₃H₈-fueled Ultra-micro Combustors with High Space Heating Rates for UMG T
 研究代表者
 湯浅 三郎 (YUASA SABURO)
 首都大学東京・システムデザイン研究科・教授
 研究者番号：60123147

研究成果の概要： 究極の超小型分散型発電システムであるウルトラマイクロガスタービン（UMGT）用の、プロパンを燃料とする Flat-flame 型高負荷極超小型燃焼器（直径 20 mm、高さ 4 mm、容積 1.26cm³、出力 60W 級）を製作した。この燃焼器はスパークプラグで容易に着火し、触媒を用いなくとも当量比 0.5 以上の範囲で安定に燃焼でき、燃焼効率 99.2 以上、NO_x 排出濃度 16ppm 以下、最大燃焼負荷率 3.3x10³ MW/(m³・MPa) を達成した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	7,200,000	2,160,000	9,360,000

研究分野：航空宇宙工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：ウルトラマイクロガスタービン、高負荷燃焼、Flat-flame
プロパン、超小型燃焼器

1. 研究開始当初の背景

究極の超小型分散型発電システムに、MIT が 1995 年に提案したウルトラマイクロガスタービン（UMGT：直径 10～20 mm、高さ 3～10 mm、空気流量～0.2g/s、出力数十 W 級）があり、世界的開発競争が起こっている。UMGT の開発には個別要素に高度な技術革新が求められ、未だに一つのシステムとしては完成を見ていない。この要素の一つである極超小型燃焼器は、UMGT に限らずパワー-MEMS の心臓部とも言えるため、盛んに研究されつつあった。極超小型燃焼器開発には二つの大きな課

題がある。その一つは燃焼方式である。いろいろな燃焼方式の燃焼器が提案されているが、それら燃焼器は、従来型のガスタービン燃焼器の概念を踏襲していたり、燃焼器極小化の本質的特性を十分考慮せず開発を行っているため、火炎安定性や燃焼効率などの点で性能の劣ったものが多かった。他の重要な課題は、高密度貯蔵と供給の容易さや経済性に優れた燃料の選択である。この点、将来の燃料と目されている水素は高密度貯蔵が極めて困難でモバイル機器の電源としては不向きであり、実用化には常温で高い蒸気圧を

有するプロパン等の炭化水素燃料を使う必要がある。しかしこれらの燃料は水素に比べて燃焼特性が著しく劣るため、炭化水素系用極超小型燃焼器の開発は、燃焼方式の選択と相まって極めて困難である。従って超小型で十分な性能を持つ炭化水素系燃料用燃焼器の開発に成功したという報告は筆者らの知る限りではなかった。

これらの課題に対して筆者らは、微小空間内燃焼の問題点を明確にした上で、それらへの対策を講じた極超小型燃焼器用 Flat-Flame バーナー燃焼方式を提案し、水素を燃料にした燃焼器内径 10.5 mm・器内高さ 1 mm の試験用高負荷極超小型燃焼器を試作し、燃焼安定性と燃焼効率の点で十分な性能を有することを実証した。さらに筆者らは炭化水素系燃料としてインフラが整備されているプロパンを選び、プロパン燃料の超小型試験燃焼器の予備的な燃焼実験に成功した。この火炎は、通常のプロパン/空気予混合気の消炎距離以下の位置に、燃焼器壁に沿うような形で火炎を形成し、特定の空気流量条件では可燃下限界よりも低い当量比範囲でも安定な火炎を形成できることが分かった。しかも従来のプロパン燃焼器に比べて燃焼負荷率も非常に高かった。しかしまだ、UMGT の定格燃焼条件達成は満足されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、UMGT の中心的要素の一つである極超小型燃焼器内の火炎構造や燃焼場、高負荷安定燃焼の支配過程を明らかにするとともに、それに基づき、プロパンを燃料とする高負荷極超小型燃焼器（目標性能@ 4 気圧：空気流量 0.15 g/s、燃焼負荷率 $1.5 \times 10^3 \text{ MW}/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa})$ ）の開発研究を行うことである。具体的には、

- (1) 微小容器内で安定燃焼を達成するために不可欠な本質的燃焼条件の特定と実証
- (2) 内径 20 mm・高さ 4 mm サイズの試験用高負荷超小型プロパン燃焼器の試作
- (3) Flat-Flame 燃焼方式における触媒燃焼の有効性の実証
- (4) 内径 10 mm・高さ 2 mm サイズの実機用高負荷極超小型プロパン燃焼器の開発を実施し、その過程で
- (5) 高負荷極超小型燃焼器の火炎安定性・火炎構造・排ガス特性・熱損失/熱移動特性・耐久性・触媒燃焼の有効性等の解明と極超小型燃焼における問題点の抽出を試みる。

3. 研究の方法

(1) 微小容器内での安定燃焼に不可欠な本質的燃焼条件を特定し実証するため、燃焼負荷率と燃焼器内滞在時間及び熱損失率との関係を考察し、関係式を構築した。それに基づいてこれらの要因間の関係が持つ燃焼学的な意味を明らかにするとともに、UMGT 用極超小型燃焼器を用いた燃焼実験によりこの関係を実証した。

(2) プロパンを燃料とした Flat-Flame 型高負荷プロパン試験燃焼器を試作し、燃焼特性を調べるとともに、触媒燃焼方式の有用性について触媒担持の有無及び担持箇所による影響を調べた。

(3) Flat-Flame 型高負荷プロパン実機燃焼器を製作し、着火・燃焼特性及び熱損失/熱移動特性・耐久性を調べるとともに、一連の実験を通して Flat-Flame 型高負荷プロパン燃焼器開発に対する課題抽出を行った。

4. 研究成果

(1) 高負荷燃焼

燃焼器極超小型化や UMGT 燃焼器開発における燃焼負荷率 SHR と燃焼器内滞在時間 τ 及び熱損失率 HLR との関係を整理し、以下の関係式を得た。

$$SHR = \frac{B \cdot C}{\tau^\beta}, \quad HLR \sim \frac{SHR^{\beta-1}}{\lambda}$$

ここで B や C は、燃料/空気理論質量混合比、燃料の発熱量、当量比、燃焼器内温度、燃焼ガスのガス対数で決まる定数であり、 β は燃焼器内外温度差に関わる係数 ($0 < \beta < 1$)、 λ は燃焼器の代表寸法である。これらの関係式と様々な実験結果とから、燃焼負荷率と燃焼器内滞在時間の関係の持つ燃焼学的な意味や UMGT 用極超小型燃焼器内燃焼に果たす高負荷燃焼の役割について考察し、以下の結論を得た。

① Fig.1 に示すように、燃焼器内滞在時間は、燃焼器を単に超小型化するから短くなるのではなく、高負荷燃焼する場合に短くなる。

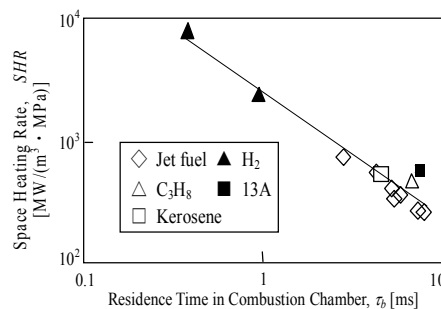


Fig.1 Relation between space heating rate SHR and residence time τ_b in combustion chambers for various gas turbines.

② Fig.2 に示すように、燃焼器からの熱損失割合は、高負荷燃焼させることによって低減できる。

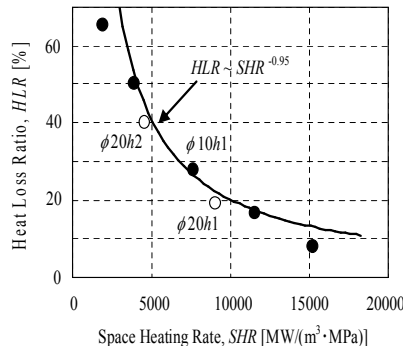


Fig.2 Relation between heat loss ratio HLR and space heating rate SHR ($\phi=0.4$, ϕ . 10h1 combustor: $m_a=0.0093\sim0.074$ g/s, ϕ . 20h1,2 combustors: $m_a=0.15$ g/s)

③ Fig.3 に示すように、燃焼負荷率と燃焼器内滞在時間との関係は、燃料の種類や燃焼器のタイプ、当量比の範囲に依らず、ほぼ同一曲線上に表示することが出来る。

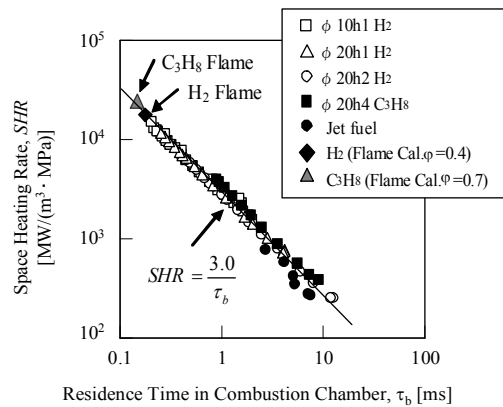


Fig.3 Relation between space heating rate SHR and residence time τ_b in various flat-flame combustors for H_2 and C_3H_8 when developing stable flames.

④ 燃焼負荷率の上限値は、Fig.3 の H_2 Flame や C_3H_8 Flame の矢印の点で示すような、燃焼器内の条件における総括的な燃焼反応の特性時間に対応する。逆に燃焼負荷率の最小値は、熱損失の増大あるいは当量比低下のため燃焼器内火炎が保炎・安定化出来ない限界によって決まる。

(2) 試験燃焼器の燃焼特性

試作した Flat-Flame 型高負荷プロパン試験燃焼器の概略図を Fig.4 に示す。燃焼室は石英管とセンターシャフトに囲まれた高さ 2~4mm, 内径 7mm, 外径 18.5mm の中空の空間で、燃焼室容積は $0.461\text{cm}^3\sim0.921\text{cm}^3$ である。

燃焼器上流で予混合されたプロパンと空気は多孔質板インジェクターを通過し、その表面上に平面状火炎を形成する。排気ガスは半径方向外側にスリットから排出される。ノズルとなる上部のふたは、低熱伝導率 $\lambda=0.03\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (at 600K) の断熱材を用いた。インジェクターは、厚さ 1mm のアルミナ多孔質セラミックス板 (平均気孔径 $130\mu\text{m}$, 気孔率 30%, 圧損 1.1%) である。触媒を使用する場合には白金を使用した。この試験燃焼器を用いて火炎安定性や燃焼効率を調べ、以下の結果を得た。

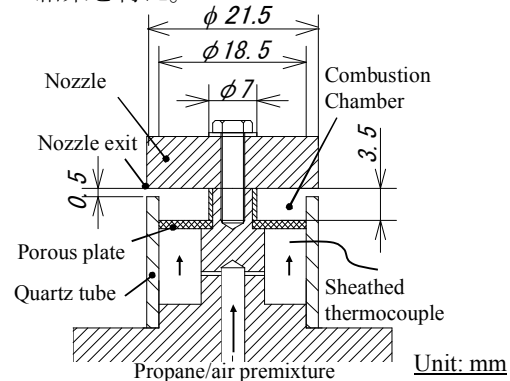


Fig.4 Schematic of prototype model propane/air flat-flame ultra-micro combustor

① 燃焼室容積 $V_c=0.461\text{cm}^3\sim0.921\text{cm}^3$ の極微小燃焼器内 (触媒なし) において、広範囲な空気流量に対して Fig.5 に示すような安定な火炎 (最大燃焼負荷率= 4538 MW/(MPa \cdot m 3)) を形成させることができた。Fig.6 にその安定限界 (Prototype model combustor : $h=3.5$ mm, $V_c=0.806\text{cm}^3$, ○印) を示す。燃焼器高さを (b) $h=2$ mm とより容積を少なくしても、燃焼負荷率が増加するため安定限界の悪化は、この図の場合に比べて僅かであり、安定な火炎が形成できた。

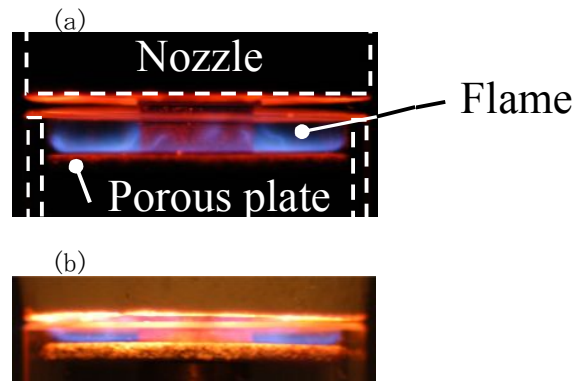


Fig.5 Typical flame appearances in flat-flame combustors ((a): $h=3.5$ mm, $V_c=0.806\text{cm}^3$ (b): $h=2.0$ mm, $V_c=0.461\text{cm}^3$) without catalyst using propane/air premixture: $\phi = 0.55$ and $m_a=0.06$ g/s

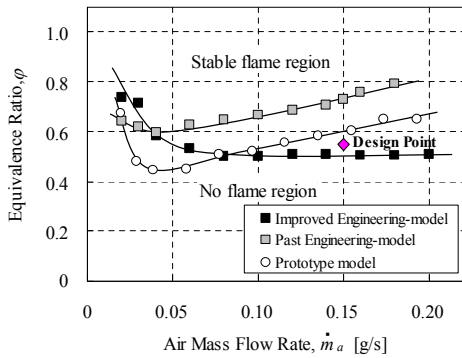


Fig.6 Flame stability limits of the improved engineering-model and prototype model propane- fueled ultra-micro combustor

② 燃焼効率 η_c は $h=3.5$ mm, $V_c=0.806$ cm³の燃焼器 (without catalyst) の場合、Fig.7 (■と□印) に示すように当量比が 0.5 から 0.7 の間では 99.4%を越す高い値が得られた。当量比が増加すると、CO の酸化反応時間が不足するため急激に燃焼効率は低下した。 $V_c=0.461$ cm³の燃焼器においても 99%を越す高い燃焼効率など、同様な結果が得られた。

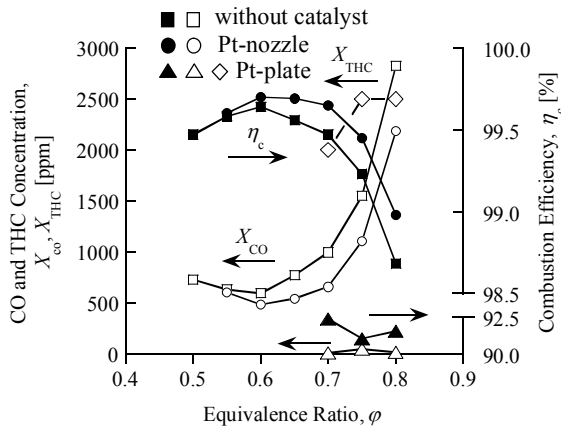


Fig.7 Concentration of CO and THC and combustion efficiencies of the flat-flame combustors without catalyst and with Pt-plate and Pt-nozzle while varying equivalence ratios at $\dot{m}_a=0.06$ g/s

(3) 触媒燃焼器の燃焼特性

Fig. 4 に示した Flat-Flame 型高負荷プロパン試験燃焼器のアルミナ多孔質板インジェクターに白金触媒を担持し、ノズルには厚さ 50 μ m の白金箔を貼り付けて、触媒の有無が火炎安定性や燃焼効率に及ぼす影響を調べ、以下の結果を得た。

① 塩化白金酸水溶液を蒸発させることでセラミックス製多孔質板インジェクターに、インジェクター質量の 6.0%の白金触媒を担持することができた。触媒担持インジェクターを用いれば、インジェクター内での触

媒燃焼だけで設計空気流量条件下で燃焼反応を維持できることを確認した。しかしインジェクター内で触媒反応すると気相燃焼が殆ど起こらず、排ガ斯特性や燃焼効率は触媒を設置しない場合よりも大幅に低下した (Fig. 7 の▲、△、◇印)。またこの場合、火炎安定限界は多孔質板インジェクターの熱膨張による石英燃焼筒の破損が起こり、正確な測定ができなかった。

② ノズル側に白金箔を設置した場合、触媒が無い場合と同様な火炎が燃焼器に形成され、かつ Fig. 7 (●と○印) に示すように、燃焼器内で気相燃焼した後の CO がさらに触媒酸化反応することによる燃焼効率の増加が確認できた。また触媒を設置しても火炎安定限界は殆ど変わらなかった。これらの結果は、ノズル側への触媒設置は全般的には有効ではあるものの、低当量比範囲において十分に安定な Flat-Flame が燃焼器内に形成されている場合には、その効果は大きくはないことを示している。

(4) 実機燃焼器の製作と燃焼特性

他の UMG 要素に対する燃焼器の配置方式や熱移動・圧力損失のような構造・材料的な評価と着火方法や火炎安定限界・燃焼効率のような燃焼特性の評価を行うために試作した Flat-Flame 型高負荷プロパン実機型燃焼器 (燃焼室内径 20 mm・高さ 4 mm・容積 1.26 cm³、再生冷却構造) の概略図を Fig. 8 に示す。この燃焼器は、燃焼器構造が単純で燃焼器から圧縮機・タービンへの熱移動を殆ど無視できる燃焼器別置き型を採った。

燃焼方式についての大きな特徴は、イ) 予混合気流路を、燃焼室を取り囲むように配置して予混合気と燃焼ガスとの熱交換を積極的に利用し、予熱された予混合気が燃焼室へ流入する構造にしていることと、ロ) 燃焼室内によどみ流れ場が形成されるように、多孔質板のインジェクターの下流に多孔板 (Nozzle Plate) を設置していることである。これらの工夫によって燃焼器周囲への熱損失の低減と燃焼室内に安定なプロパン火炎の形成を図った。着火は燃焼室内部に挿入した極細ステンレス線のスパークプラグ (着火エネルギー: 1.9 mJ) により行った。燃焼器の構造材料には高い断熱性と耐熱性、十分な緻密性・強度を持つ必要であるため、当初、燃焼室外壁には酸化ケイ素系のセラミックスを用い、その外側をステンレスで覆う二層構造としていた。しかし数時間の燃焼実験によってセラミックスとステンレスとの熱膨張率の違いからセラミックスに割れが生じ

ることが分かったため、熱損失よりも機械的性質を優先して全てステンレス製に変更した。火炎に直接さらされる多孔板のみは、より耐熱性の高い金属の Hastelloy を用いた。

この実機型プロパン燃焼器を用いて、着火方法・火炎安定限界・燃焼効率・耐久性・熱損失等を調べ、以下の結果を得た。

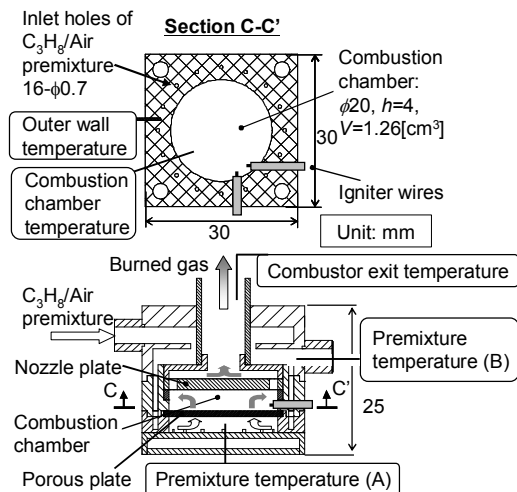


Fig.8 Schematic of an engineering-model of a propane-fueled flat-flame ultra-micro combustor for a UMG T with a 60 W output

① 設計点を含む広範囲な空気流量条件下で、空気流量が極端に少ないか、逆に多い場合を除いて、ほぼ決まった当量比 0.8 付近でスパークプラグによって確実な着火が可能であった。

② Fig.6 に実機燃焼器の安定限界 (Improved Engineering-model Combustor, ■印) を示す。燃焼ガスとの熱交換によって燃焼室に流入する予混合気の温度が空気流量の増加とともに上昇する結果、試験燃焼器では達成できなかった設計稼働条件 (空気流量 0.15 g/s、当量比 0.55、◆印) を満たし、広範囲な空気流量にわたって安定限界の当量比がほぼ一定になることがわかった。

③ Fig.9 に実機型燃焼器の燃焼効率と排ガス濃度を示す。燃焼器から排出される CO 濃度は高当量比領域で試験燃焼器よりも低く、これに対応して燃焼効率も高く、燃焼負荷率 $2.8 \times 10^3 \text{ MW}/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa})$ で 99.5% を達成した。NOx 濃度も 5 から 14 ppm 程度と低かった。これらの結果より、プロパンの希薄な予混合燃焼が、Flat-Flame 燃焼方式を用いることによって微小空間であっても極めて高負荷な状態で達成できることを、実機型燃焼器でも実証できた。

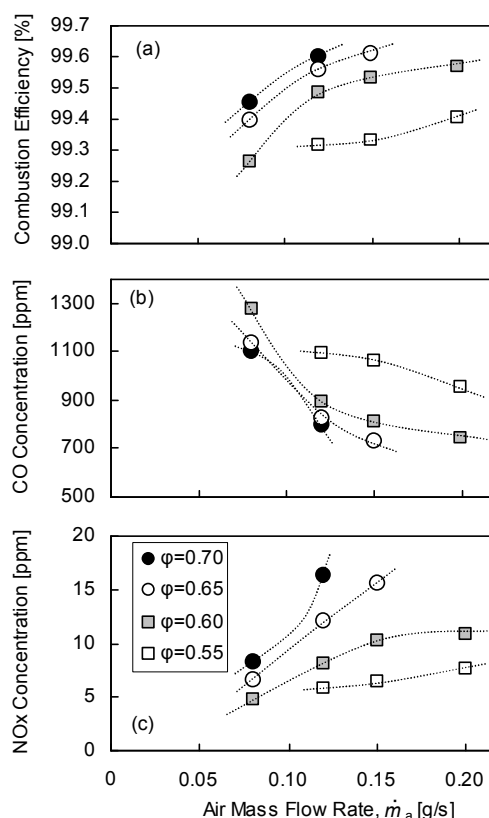


Fig.9 Combustion efficiency, CO and NOx concentrations of the combustor at different air mass flow rates and equivalence ratios

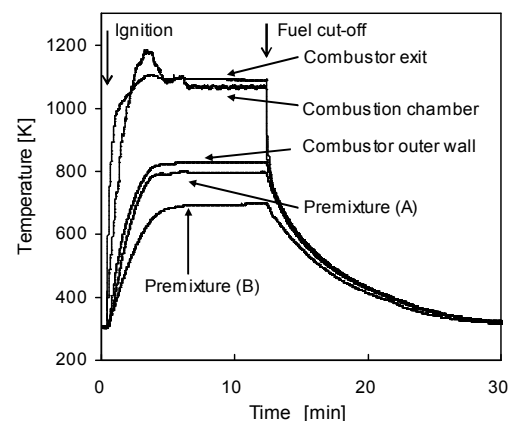


Fig.10 Typical time record of temperatures of the combustor under the design operation condition of $m_a = 0.151 \text{ g/s}$ and $\phi = 0.55$

④ Fig.10 に設計稼働条件下で測定した代表的な燃焼器各部の温度履歴を示す (着火時には燃焼器壁温が低いので①の様に当量比を高くし、安定な火炎が形成された後に当量比を設計条件に調節した)。発熱量に対する燃焼器の熱容量が大きいので温度上昇が緩慢であるが、上昇後は一定の温度を維持し、予混合気は燃焼室の周囲を通過する間に約

100 K の予熱効果が得られることがわかった。ただし壁温が約 850 K と高く、燃焼器周囲へ発熱量の 40% を超す大きな熱損失を生じており、熱損失低減に向けて燃焼器の断熱構造を改良する必要がある。また定常燃焼時の設計稼働条件における燃焼器全体の圧力損失は 8.4% であった。この主たる要因は、逆火防止と混合促進のために多孔質板インジェクター上流の予混合気室流入部に設けた細孔部の面積が狭かったためであり、実用化に際しては圧力損失低減も図る必要がある。

(5) 研究成果の総括

本研究で得られた上述の成果を当初の研究目的と照らし合わせてみると、本研究の申請期間内には、4 気圧下での燃焼特性を取得することや、より小型な内径 10 mm ・高さ 2 mm サイズの極超小型プロパン燃焼器を製作するまでには至らなかった。しかし本研究で得られた成果において、プロパン燃料の極超小型燃焼器に Flat-Flame を用いることはオリジナルな燃焼方式であり、さらに触媒を使用せずに燃焼効率 99.2 以上、NO_x 排出濃度 16ppm 以下、最大燃焼負荷率 3.3×10^3 MW/(m³・MPa) を達成したことは世界最先端の性能と言える。事実、幾つかの論文において超小型燃焼器用 Flat-Flame 燃焼方式の研究が進められており、また筆者らの性能を上回る結果は筆者らの知る限りでは得られていない。

今後実用的な実機燃焼器開発に際しては、燃焼器全体からの熱損失を大幅に低減するための熱再循環や断熱構造及び耐熱材料の選択が必要不可欠な重要な課題であることが明確になった。これらの成果より、本研究において当初目的は十分に達成できたと言える。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件、査読有り)

○笛田剛志、桜井毅司、湯浅三郎、UMGT 用実機型水素燃料極超小型燃焼器の燃焼特性、日本機械学会論文集 (B) 技術ノート、76 巻 763 号、pp.364-365, 2010.

○湯浅三郎、下鳥翔子、本田拓、桜井毅司、十河桜子、UMGT 用極超小型燃焼器内での高負荷燃焼に対する一考察、日本燃焼学会誌、Vol.51, No.156、pp.142-148、2009.

○Sakurai, T.、Yuasa, S.、Honda, T.、and Shimotori, S.、Heat Loss Reduction and Hydrocarbon Combustion in Ultra-micro Combustors for Ultra-micro Gas Turbines, Proc. Combust. Inst. Vol.32, pp. 3067-3073, 2009.

○Yuasa, S.、Sakurai, T.、Shimotori, S.、Honda, T.、and Fueda, T.、Development of Engineering-models of H₂-fueled and C₃H₈-fueled Ultra-micro Combustors for UMGT, Proc. 19th International Symposium on Airbreathing Engines, 2009-1310, 2009.

○Yuasa, S.、Sakurai, T.、Shimotori, S.、and Wong, S.F.、Issues for Developing Ultra-micro Combustors for UMGT : Heat Loss, Combustion Method and Fuel, Proc. 18th International Symposium on Airbreathing Engines, 2007-1167, 2007.

○Sakurai, T.、Yuasa, S.、and Honda, T.、Concept and Experiment of a Propane-fueled Flat-flame Ultra-Micro Combustor for UMGT, Proc. International Gas Turbine Congress 2007, IGTC-TS-147, 2007.

[学会発表] (計 9 件)

○桜井毅司、本田拓、湯浅三郎、焼室形状を改良した UMGT 用実機型プロパン燃料超小型燃焼器の燃焼特性、第 37 回日本ガスタービン学会定期講演会論文集、pp. 43-46、2009.

○本田拓、桜井毅司、湯浅三郎、UMGT 用プロパン燃料超小型燃焼器の燃焼特性の把握、第 46 回燃焼シンポジウム講演会論文集、pp. 108-109、2008.

○本田拓、下鳥翔子、桜井毅司、湯浅三郎、UMGT 用プロパン燃料燃焼器の成立可能性の実験的検討、第 35 回日本ガスタービン学会定期講演会論文集、pp. 45-49、2007.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

湯浅 三郎 (YUASA SABURO)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号 : 60123147

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

桜井 毅司 (SAKURAI TAKASHI)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号 : 10433179