

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820373

研究課題名(和文)多孔質材を用いた超小型ガスタービン用液体燃料燃焼器の高負荷クリーン燃焼

研究課題名(英文)High intensity, clean combustion for liquid fuel combustor for micro gas turbine by using porous material injector

研究代表者

櫻井 毅司 (Sakurai, Takashi)

首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：10433179

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では出力数百W級超小型ガスタービンに適用可能な液体燃料燃焼器の開発を目標として、多孔質体を用いて液体燃料の予蒸発・予混合燃焼を実現する燃焼技術の確立に取り組んだ。円筒型セラミックス多孔質体で灯油燃料を予蒸発できることを実証し、希薄予混合燃焼が得られていることを火炎観察、火炎安定限界および排ガス濃度計測で確認した。燃焼効率99.7%以上においてNOx値は十数ppmの良好な燃焼状態を達成出来た。燃焼器の圧力損失は2%程度に抑えることが可能であり、目標とする燃焼技術をほぼ確立することが出来た。

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop the lean premixed, prevaporized combustion of liquid fuel by using the porous material injector toward the realization of combustor for several hundred W-class micro gas turbines. The kerosene fuel was successfully vaporized in the cylindrical ceramics porous injector. The results of flame appearance, flame stability limit, and exhaust gas emission indicated the occurrence of the lean premixed combustion. The combustor attained the NOx emission of less than 15 ppm under the combustion efficiency of more than 99.7% and the pressure loss ratio of less than 2%.

研究分野：燃焼工学，推進工学

キーワード：超小型燃焼器 多孔質燃焼 予蒸発予混合燃焼 超小型ガスタービン

### 1. 研究開始当初の背景

超小型ガスタービンはリチウムイオン電池よりも出力・エネルギー密度に優れた小型電源であり、自立移動型ロボットや小型無人航空機の電源として既存電池に置き換わる可能性がある。このようなガスタービンに用いる燃焼器では微小空間の燃焼となるため、燃焼の反応時間が不十分となり完全燃焼の達成が困難となる。加えて、超小型化により燃焼器の表面積/体積比が大きくなるために熱損失も顕著となり燃焼効率がさらに低下する。

良好な燃焼効率を達成するために超小型燃焼器ではガスタービンに一般に用いられる液体燃料ではなく、予混合気の形成し易さや燃焼反応性に富む水素やプロパンなどの気体燃料が主に用いられてきた。実用の観点からは液体燃料の使用が望ましいが、燃料の微粒化や気化・空気との混合が微小空間では困難となるため、超小型ガスタービンでは液体燃料を用いる試みは世界的にも数例あるのみ (Sadasivuni, V. et al., 2009) で未だ研究開発段階にある。

筆者は水素やプロパンの微小空間燃焼方式として多孔質体を用いた Flat-flame 燃焼方式が有用であることを実証してきた。図1に示すように Flat-flame 燃焼方式では、火炎の熱が多孔質体を介して予混合気へフィードバックし、予混合気の温度が上昇する。この温度上昇により予混合気の反応性が良くなり、微小燃焼に伴う短い滞在時間や熱損失の課題を克服して、良好な燃焼が達成される。本研究では、この多孔質体で生じる熱フィードバック効果を液体燃料の気化や空気との混合にも応用し、超小型ガスタービン用燃焼器の新たな燃焼技術を確認することを目標とした。

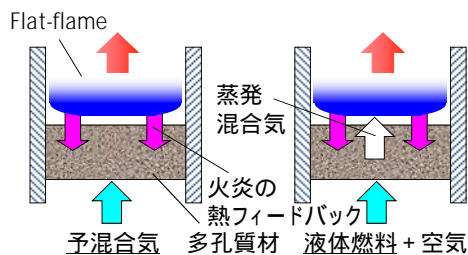


図1 多孔質体による熱フィードバック機構

### 参考文献

Sadasivuni, V. et al., A novel meso-scale combustion system for operation with liquid fuels, Proc. Combust. Inst., 32(2), 2009, 3155-3162.

### 2. 研究の目的

本研究の目的は超小型燃焼器において多孔質体を用いた液体燃料の蒸発を実証し、コンパクトで高負荷、排ガスのクリーンな液体燃料に適する超小型ガスタービン用燃焼器の燃焼技術を確認することである。研究内容を以下の3段階に分け、(1) 燃焼コンセプト

の実証、(2) モデル燃焼器による基礎的な燃焼特性の解明、(3) ガスタービン搭載型燃焼器の製作・燃焼特性の把握・性能評価、を行い、最終的に多孔質体を用いる液体燃料用超小型ガスタービン燃焼器に適した燃焼方式を決定する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 多孔質体を用いた燃焼コンセプトの実証

多孔質体における液体燃料の蒸発の有無および蒸発した燃料と空気の予混合火炎の形成を確認し、多孔質体を用いた超小型燃焼器の実現可能性を検討する。

長さや厚さの異なる多孔質体(材質、耐熱温度、気孔率、熱伝導率)を数種類選定し、モデル燃焼器でそれぞれに形成される火炎を評価する。

燃焼実験で以下の項目を調べ、コンセプトに適合する多孔質体選定の基礎データを取得する。

- ・直接可視化 火炎の形成位置や形状
- ・熱電対による温度計測 多孔質体や燃焼器内の温度分布

#### (2) モデル燃焼器を用いた基礎燃焼特性の解明

空気流量と当量比をパラメータとして火炎形成条件や火炎形状を調べ、燃焼器の火炎安定性を評価する。

ガス濃度計測器により CO, NO<sub>x</sub>, 未燃炭化水素燃料などの排ガス性状およびその排出原因を調べる。

排ガス中の未燃燃料濃度より燃焼効率を評価する。

#### (3) 超小型ガスタービン搭載用燃焼器としての燃焼特性の把握・性能評価

振動燃焼の発生有無や長時間使用に対する燃焼器材質の健全性などを評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) 多孔質体を用いた燃焼コンセプトの実証

想定する超小型ガスタービンの燃焼器仕様は空気流量 12g/s, 全体当量比 0.32, 全圧損失率 2%, 燃焼負荷率 400MW/(MPa・m<sup>3</sup>)である。燃焼器の形状はアニュラ型を採用した。燃焼方式は低 NO<sub>x</sub> 燃焼に有利な希薄予混合燃焼を目標とする。

実験で用いた4孔型燃焼器概略図と多孔質インジェクター拡大図を図2に、円筒型燃焼器概略図を図3に示す。4孔型燃焼器は空気を4カ所、燃料は2カ所から供給される。空気は予混合室の接線方向に供給し、旋回流による混合の促進と中心軸に沿って生じる再循環領域を形成し火炎を安定化させる。燃料には灯油を用い、供給管から多孔質インジェクターを通り燃焼室へ供給される。円筒型燃焼器は空気孔6カ所、灯油燃料は2カ所から供給される。多孔質体の形状は円筒である。それぞれの燃焼器には燃料と空気の混合促進と火炎安定性の向上に有効な絞り板を設置した。絞り比=1-(絞り部断面積/予混合室

断面積)と定義する。4孔型燃焼器の場合は絞り比0.18と0.37,円筒型燃焼器では0.18,0.53,0.70で実験を行った。

実験にはセラムックス多孔質体を用い,主成分が炭化ケイ素またはアルミナ,熱伝導率8.1~9.3W/(m・K),気孔率45~50%,平均気孔径100~230 $\mu$ mのものを数種類試した。

実験は予め灯油燃料を拡散燃焼させ,多孔質体の温度が170を超えてから測定を開始した。

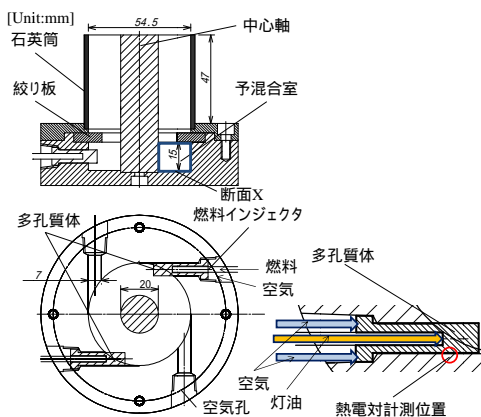


図2 4孔型燃焼器概略図および多孔質インジェクター拡大図

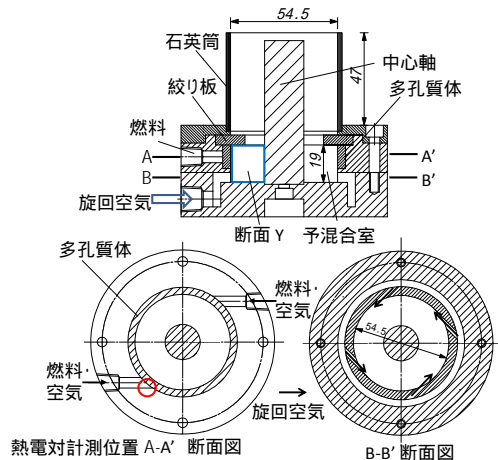


図3 円筒型燃焼器概略図

4孔型で用いた多孔質インジェクターおよび円筒型多孔質体のいずれにおいても,多孔質体の長さや材質・熱伝導率,気孔率を変えることによる火炎や燃焼状態への本質的な変化は生じなかった。むしろ多孔質体の形状の違い(多孔質インジェクターと円筒)の方が燃焼状態に及ぼす影響は大きいことが明らかとなった。

(2)の成果も含む)4孔型燃焼器の火炎安定限界と火炎写真を図4に示す。図4の横軸は空気孔から噴出する空気の断面X(図2)における円周方向流速,縦軸は全体当量比である。この燃焼器では円周方向流速3.2m/s未満では多孔質付着火炎と浮き上がり火炎の両方が形成され,一方3.2m/s以上では浮き上がり火炎のみが形成された。また,多孔質体内部の当量比を計測した結果,多孔質体内部当量比が20以上の非常に大きな値を取って

おり多孔質体からは意図したような予混合気が供給できていなかった。灯油燃料の油滴や油膜が燃焼器内には観察されなかったことから灯油が液相のまま火炎が形成されることはなく,多孔質体内部で灯油が気化しているものと推測された。

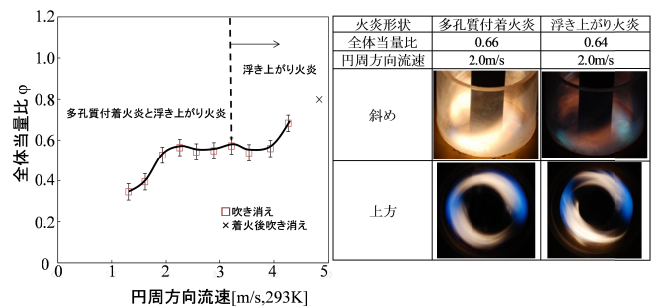


図4 4孔型燃焼器における火炎安定限界(絞り比0.18)と代表的な火炎写真

円筒型燃焼器の絞り比別の火炎写真を図5に示す。円周方向流速は予混合室円周方向の室温での断面Y(図3)における流速である。絞り比を変えると形成される火炎の様子が変わり,その値が大きくなるほど輝炎は小さく青炎領域が大きくなった。図6の火炎安定限界から,いずれの絞り比でも円周方向流速が増加すると吹き消え当量比は増加する。絞り比が大きくなると火炎吹き消えの限界当量比は0.5~0.6の範囲になり灯油/空気の希薄可燃限界とほぼ一致するようになり,希薄予混合火炎の形成が示唆された。多孔質体のみならず,絞り板も灯油と空気の混合に大きな影響を与えていることがわかる。火炎およびその安定限界からは,円筒型多孔質体のほうが多孔質体インジェクターよりも灯油燃料の蒸発や空気との混合に優れると判断でき,以降の実験では円筒型燃焼器に絞ってさらに研究を進めることとした。

Orifice contraction ratio	0.18	0.53	0.7
Equivalence ratio	0.8	0.8	0.8
Circumferential air flow velocity	1.5m/s	1.5m/s	1.5m/s
Air flow velocity of porous cylinder	0.13m/s	0.13m/s	0.13m/s
Oblique view			
Side view			

図5 円筒型燃焼器における絞り比別の火炎写真

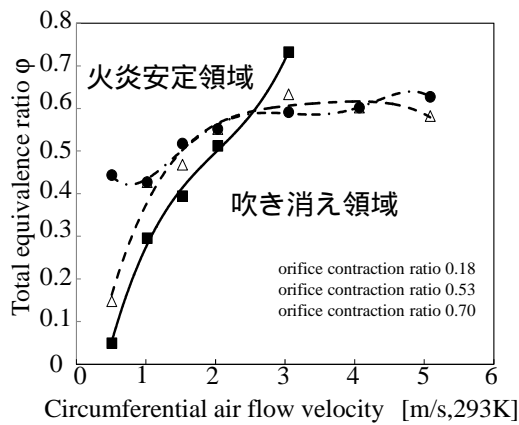


図 6 円筒型燃焼器の火炎安定限界

図 7 は火炎安定限界計測時の代表的な多孔質体の温度履歴である .50 秒付近から段階的に燃料流量を減少しており、それに伴って温度が増減している。流量変化に対して多孔質体の温度が平衡になるまで数秒を要していることが分かった。

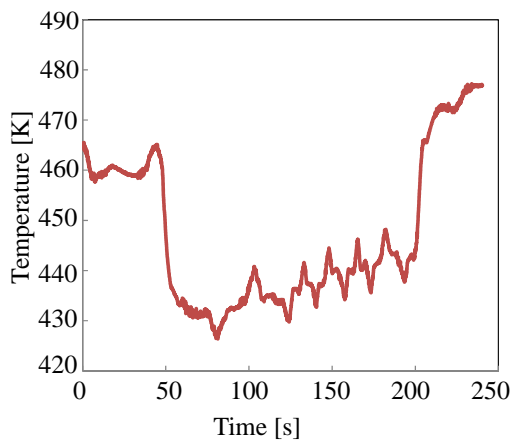


図 7 火炎安定限界計測時の代表的な多孔質体温度履歴 (円筒型燃焼器, 絞り比 0.70, 空気流速 3m/s)

(2)モデル燃焼器を用いた基礎燃焼特性の解明

(1) に研究成果をまとめた。

図 8 は円筒型燃焼器で絞り比を 0.50 と 0.80 とした場合の排ガス濃度および燃焼効率を示した結果である。なお、当量比は 0.8 で一定とした。図 5 において輝炎の見られた絞り比 0.5 では CO 濃度および未燃炭化水素 (THC)濃度ともに、絞り比 0.80 よりも高い値を示す傾向にある。絞り板が燃焼状態に影響することが明らかであり、絞り比 0.8 のほうが燃焼効率が高い。一方、NO<sub>x</sub> 濃度を比較すると絞り比 0.80 の方が燃焼効率が高いにも関わらず NO<sub>x</sub> 値は絞り比 0.50 よりも低い値を示している。すなわち、絞り比 0.80 では同一の当量比でもより予混合燃焼に近い燃焼状態を達成できていることを示唆している。

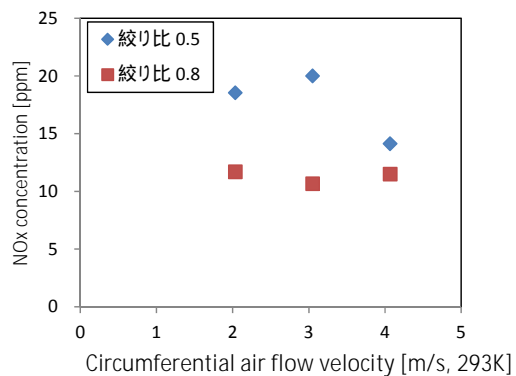
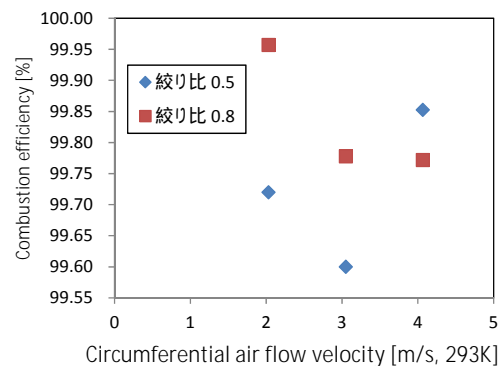
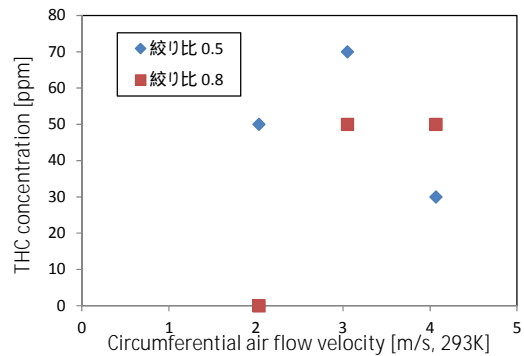
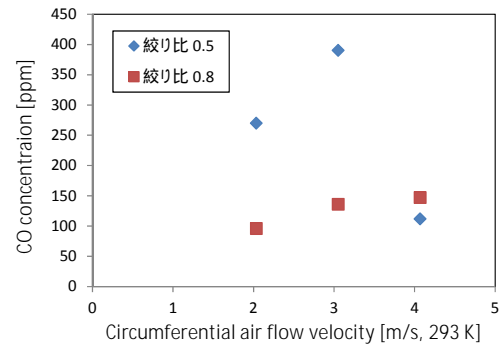


図 8 円筒型燃焼器の排ガス性状(当量比 0.8)

(3)超小型ガスタービン搭載用燃焼器としての燃焼特性の把握・性能評価

円筒型燃焼器においてガスタービンへの搭載を模擬して出口の面積を縮小し絞りを付けたが、燃焼室の圧力に大きな振幅や周波数の変化は観察されず振動燃焼は生じなかった。合計で十数時間の燃焼実験を同一の多孔質体で実施したが、割れや多孔質の劣化は

見られなかった。また、燃焼実験で燃焼器や多孔質体の温度が 200 程度まで上昇した後、燃料供給を停止したが若干のコーキングによる多孔質体の変色が見られたが目詰まりを生じるまでではなかった。多孔質体を用いることによる圧力損失については、その厚さが 10mm 以上になると圧損は 5%程度となり実用には適さないが、厚さを 5mm 以下に抑え、かつ燃焼器への空気配分を調整することにより燃焼器としての圧力損失を 2%以下に低く抑えることが可能となる。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

Harada, R., Kobori, Y., Sakurai, T.,  
Development of a Pre-vaporized Combustor  
using a Porous Media for a Kerosene-fueled  
Micro Gas Turbine, International Gas  
Turbine Congress 2015, 2015 年 11 月 15 日  
~ 20 日, 虎ノ門ヒルズ(東京都・港区)  
原田亮, 櫻井毅司, 湯浅三郎, 超小型ガ  
スタービン用灯油燃料燃焼器への多孔質  
体を用いた予蒸発燃焼の検討, 第 42 回日  
本ガスタービン学会定期講演会, 2014 年  
10 月 22 日 ~ 23 日, 熊本市国際交流会館  
(熊本県・熊本市)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

櫻井 毅司 (SAKURAI, Takashi)  
首都大学東京・システムデザイン研究科・  
准教授  
研究者番号: 10433179