

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420159

研究課題名(和文) 低カロリーバイオガス燃料用マイクロガスタービン燃焼器の開発とその燃焼特性の解明

研究課題名(英文) Development of micro gas turbine for low calorific biogas fuel and investigation of the combustion characteristics

研究代表者

野田 進 (Noda, Susumu)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60124054

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：低カロリーバイオガス燃料を使用するマイクロガスタービン燃焼器(出力5kW)の開発とその燃焼特性の解明が本研究の目的である。下水汚泥由来のバイオガス燃料の適用を検討した。下水汚泥バイオガス燃料は窒素を多く含み、さらに発熱量がメタンのおよそ10分の1程度となる。したがって、低NOx燃焼技術と安定燃焼技術の両者が同時に求められる。安定性の高い旋回噴流燃焼器のマイクロガスタービン燃焼器への適用を検討した。その結果、平均発熱量(3400kJ/Nm<sup>3</sup>)の場合、一次噴流燃料流量、一次旋回燃料流量、二次旋回燃料流量の比を1:3:1とすることで、安定な低NOx燃焼が実現できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The development of a micro gas turbine of a power of 5 kW which is able to use low calorific biogas fuel and the investigation of the combustion characteristics have been implemented. The biogas fuel originated from sewage has been examined as steady and prospective fuel. However, the fuel contains a lot of nitrogen and the calorific value is one tenth of methane. Thus, both low NOx and steady safety combustion technologies are required simultaneously. Then, a cyclon jet combustor developed in our laboratory has been applied to the micro gas turbine. For a calorific value of 3400 kJ/Nm<sup>3</sup>, steady and low NOx combustion has been accomplished under a fuel ratio of 1:3:1 for a jet and a swirler on the first stage and a swirler on the second stage.

研究分野：燃焼工学

キーワード：バイオガス燃料 マイクロガスタービン 燃焼器 安定燃焼 低NOx 緩慢燃焼

1. 研究開始当初の背景

(1) 原発事故以来、エネルギー源の多様化が求められている。グリーンエネルギーの開発は緊急の課題である。しかし、原子力、化石燃料に代わる決定的なエネルギー源は現時点で見当たらない。将来的には多種のエネルギー源によるバランスあるエネルギー利用が求められる。燃焼技術は化石燃料を使用するエネルギー技術として高度に発達してきたが、化石燃料の枯渇、また地球温暖化物質である CO<sub>2</sub> の排出等の環境問題を抱えている。この燃焼技術を生かしながら、持続可能な社会を構築する方策の一つとして、下水汚泥バイオガス燃料の利用がある。下水汚泥の大半が植物由来の有機物廃棄物であり、CO<sub>2</sub> ゼロエミッション燃料である。

下水汚泥は日本で年間223万トン(2008年)あり、その多くは有効に利用されていない。大半が焼却、埋め立て処理されている。下水汚泥のエネルギー量は原油換算で約 98 万キロリットルとなり、エネルギーの一部を賄うことができる。下水汚泥バイオガス燃料の利点は政治経済等に影響されない燃料であり、安定供給が可能なことである[アジアバイオマスオフィス HP]。ただし、欠点は窒素成分が多く、可燃性気体の割合が少ないことである。このため下水汚泥バイオガス燃料は低カロリー燃料(約 4000kJ/Nm<sup>3</sup>)であり、窒素酸化物(NOx)の排出が増加する。

バイオガス燃料の有効利用のため、既存のディーゼル機関等で発電を試みた例はある[イエンバッハ社ガスエンジン]。しかし、燃料の発熱量不足のため安定燃焼が困難であることから補助燃料として天然ガス等を利用しており、完全な低カロリー燃料の燃焼技術が確立されていない状況にある。低カロリーバイオガス燃料の有効利用には、燃料供給規模および安定燃焼の実現から、マイクロガスタービンへの応用が最も可能性が高い。また、低カロリー燃料の燃焼技術の確立はバイオガス燃料に限らず、高炉ガス、コークスガス等の利用にも期待される。

2. 研究の目的

(1) 低カロリーバイオガス燃料を使用するマイクロガスタービン燃焼器(出力 5kW)の開発とその燃焼特性の解明が本研究の目的である。本研究では安定供給が可能な下水汚泥由来のバイオガス燃料の適用を検討している。ただし、下水汚泥バイオガス燃料は窒

ガス組成	H <sub>2</sub>	11vol%
	CO	13vol%
	CH <sub>4</sub>	3vol%
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.2vol%
	N <sub>2</sub>	57vol%
	CO <sub>2</sub>	13vol%
低位発熱量	3900kJ/Nm <sup>3</sup>	

表 1 下水汚泥バイオガス燃料

素を多く含み、さらに発熱量がメタンのおよそ 10 分の 1 程度となる(表 1)。したがって、低 NOx 燃焼技術と安定燃焼技術の両者が同時に求められる。また、バイオガス燃料は起源に依存して、約 10%程度の変動がある。これらの条件に対応するため、これまでに開発した極めて安定性の高い旋回噴流燃焼器のマイクロガスタービン燃焼器への適用を検討した。

3. 研究の方法

本研究の基本的なアイデアは研究実施者がこれまでに開発した旋回噴流燃焼器(図 1)の応用である[小沼, 野田, 2000]。

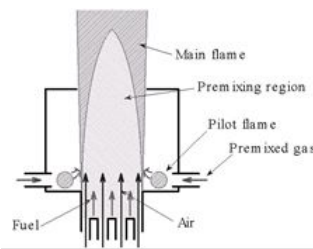


図 1 旋回噴流燃焼器

旋回噴流燃焼器は燃焼器中央部下部から燃料と空気が噴出し、噴流拡散火炎を形成する。噴流拡散火炎基部周囲にはドーナツ状の旋回予混合火炎もしくは旋回拡散火炎のパイロット火炎(旋回パイロット火炎)を形成する。この旋回パイロット火炎は火炎自身が生成した既燃ガスによって予熱を受けるため、極めて安定な火炎となる。中心の噴流拡散火炎は旋回パイロット火炎の火種を連続して受けることが出来、安定な噴流拡散火炎が形成される。申請者はこれまでの実験で旋回パイロット火炎が同軸流パイロット火炎に比べ、約 30 倍以上の保炎力が存在することを明らかにした[小沼, 野田, 2000]。

旋回噴流燃焼器を一次燃焼器とし、二次旋回燃焼器を組み合わせることで、マイクロガスタービンを製作した(図 2)。

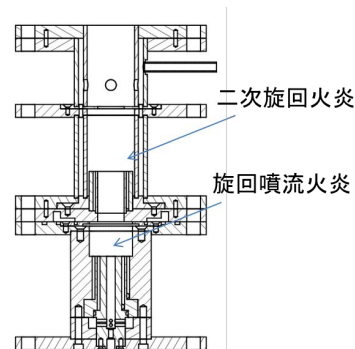


図 2 マイクロガスタービン燃焼器の概略

本研究で提案するマイクロガスタービン燃焼器は、高効率・低 NOx 燃焼を実現するために一次主火炎、旋回パイロット火炎、二次旋回火炎との相互作用が重要な課題とな

る．本研究はこの点を実験および解析から説明した．具体的には，一次燃焼器の噴流火炎，旋回火炎，二次燃焼器の旋回火炎の組み合わせが本マイクロガスタービンの燃焼特性に影響するため，燃料比，空気比を変えながら濃度，温度測定と火炎写真撮影から調査した．また，発熱量の変動の安定特性への影響についても検討した．さらに，数値解析から燃焼特性の評価を行った．

#### 4. 研究成果

図2に示した5kWマイクロガスタービン燃焼器の燃焼特性を調査した．下水汚泥バイオガス燃料の発熱量が3000, 3400, 3700 kJ/Nm<sup>3</sup>の場合について調査したが，ここでは発熱量が3400 kJ/Nm<sup>3</sup>の場合の結果を示す．

一次噴流燃料流量，一次旋回燃料流量，二次旋回燃料流量の比を1:1:1, 1:3:1, 1:2:0とした．二次旋回空気流量を20L/minと固定し，一次噴流空気流量と一次旋回空気流量を変化させて，実験を行った．このときの火炎の安定燃焼範囲を図3に示す．一次噴流空気流量が20L/minから70L/min，また一次旋回空気流量が20L/minから70L/minの範囲に安定燃焼領域が広く存在する．さらに，一次燃焼の発熱量が大きく，また噴流燃焼に比べ，旋回燃焼の発熱量が増大すると，燃焼安定範囲が増加する．

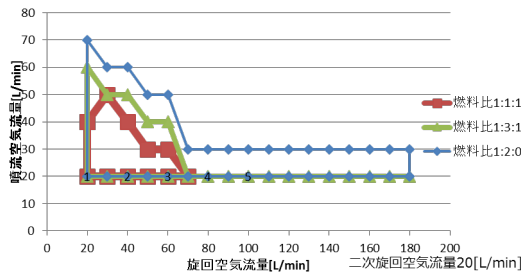


図3 安定燃焼範囲

図3の図中に示した番号に対応する条件の火炎写真を図4に示す．中心部の一次噴流火炎とその外側のドーナツ状の二次旋回火炎が確認される．一次燃焼の燃料流量が増加するに従い，中心の一次火炎が明瞭になり，また一次旋回空気流量が増加すると，二次火炎の輝度が低下する．燃焼器の負荷を考慮すると，一次燃焼と二次燃焼が同程度になることが望まれる．

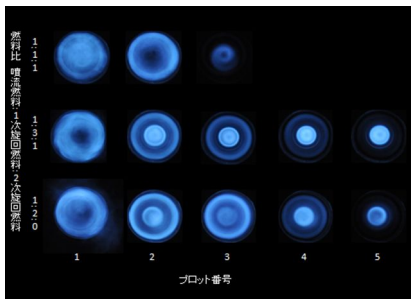


図4 火炎写真

つぎに，燃焼器の特性を支配するもう一つの重要な因子であるNO<sub>x</sub>とCOの排出指数(EINO<sub>x</sub>, EICO)特性を調査した．その結果を図5と図6に示す．NO<sub>x</sub>とCOの排出にはトレードオフの関係がある．本燃焼器においてもその傾向が明確に表れている．ただし，燃焼器として採用できる条件はまず，CO排出量が1.2 g/kgfuel以下でなければならないので，この条件に合うのは総括当量比が0.7と0.8である．この条件に対し，NO<sub>x</sub>排出指数はいずれも低い値を示すが，最適な条件は一次噴流燃料流量，一次旋回燃料流量，二次旋回燃料流量の比が1:3:1の場合である．本燃焼器のNO<sub>x</sub>排出指数がいずれも低い値を示した理由として，燃料の発熱量が低いため，これに対応し，火炎温度が低くなっているためと考えられる．

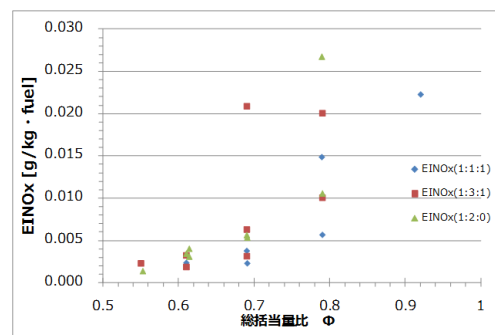


図5 NO<sub>x</sub> 排出指数

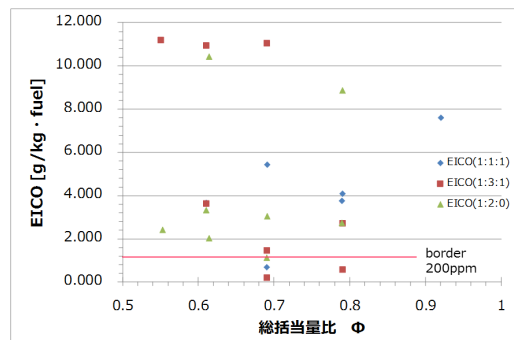


図6 CO 排出指数

つぎに，一次燃焼器の燃焼特性を実験および数値解析から評価した．特に，一次噴流空気の供給方法について，同軸型と多孔噴出型の比較を行った．対象とした一次噴流空気ノズルを図7に示す．

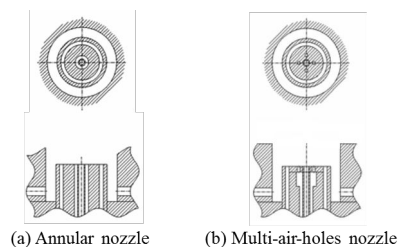


図7 一次噴流空気ノズル

解析ではオープンソースの流体ソフトである OpenFORM を使用した。

実験結果と解析結果の一例を図 8, 9 に示す。

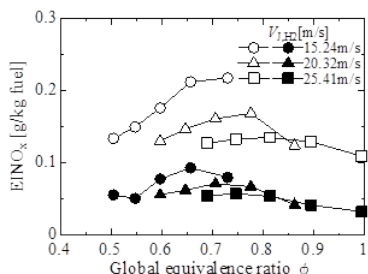


図 8 NOx 排出指数 (実験): 同軸ノズル, 多孔ノズル

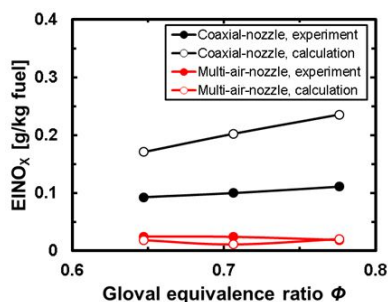


図 9 NOx 排出指数 (解析): 黒: 同軸ノズル, 赤: 多孔ノズル

実験および解析から明らかなように同軸ノズルに比べ、多孔ノズルの NOx 排出特性は極めて低くなる。解析では EINO<sub>x</sub> が極めてゼロに近く、多孔ノズルの有効性が明らかである。これは多孔ノズルにおいて、周囲に形成されている旋回火炎の既燃ガスが噴流空気間を通過することで、噴流火炎を希釈するためと考えられる。

図 10 は多孔空気噴流ノズルを使用した場合の OH 濃度分布を示している。測定位置は一次燃焼器の出口から下流 5mm である。この図から明らかなように、周囲の旋回火炎で形成された OH ラジカルが空気噴流間を通過し、中心火炎にまで達しており、上述の内容を裏付けている。

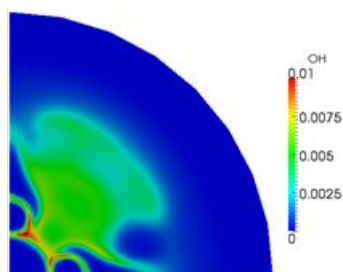


図 10 OH ラジカル濃度分布

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 7 件)

Goto, R., Oku, T., Matsuoka, T., Noda, S., Stabilization and Structure of a Hydrogen Flame using a Cyclone-Jet Burner, ISROMAC-15, Honolulu, USA, February, 2014.

Somarathne, K.D.K.A., Noda, S., Realization of the Effect of Self-Dilution Characteristics in Confined Flames on NO<sub>x</sub> Abatement, The 35<sup>th</sup> International Symposium on Combustion, San Francisco, USA, August, 2014.

Sato, K., Miyagi, W., Miki, S., Noda, S., Numerical Analysis of Confined Hydrogen Jet as a Coupled Heat Transfer problem between reacting flow and Solid wall, The 9<sup>th</sup> Mediterranean Combustion Symposium, Rhodes, Greece, June, 2015.

Ito, T., Nakao, Y., Ishikawa, T., Noda, S., Effect of Oxidizer dilution on Impinging Propane/Air Premixed Flames, ASPACC10, Beijing, China, July, 2015.

石川, 松岡, 野田, 壁面衝突プロパン・空気予混合火炎特性への燃料希釈の影響の数値的解明, 第 25 回内燃機関シンポジウム, つくば市, 11 月, 2014.

山口, 松岡, 野田, 高圧下における水素噴流正逆拡散火炎の燃焼特性の実験的研究, 第 52 回燃焼シンポジウム, 岡山市, 12 月, 2014.

佐藤, 松岡, 野田, 壁面熱流束を考慮した小型円筒燃焼器の炉内燃焼解析, 日本機械学会東海支部第 64 回講演会, 春日井市, 3 月, 2016.

ホームページ

[http://www.me.tut.ac.jp/ece/main\\_jp.htm](http://www.me.tut.ac.jp/ece/main_jp.htm)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

野田 進 (NODA Susumu)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60124054