

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05509

研究課題名(和文) 渦流による可燃限界拡張・高速熱伝達現象のメカニズム解明と小型発電システムへの応用

研究課題名(英文) Investigation on the extension of flammable range and rapid heat transfer by the vortex flow and its application to the miniature power system

研究代表者

下栗 大右 (Shimokuri, Daisuke)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40432687

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、渦流中を伝播する火炎に対してレーザー計測を行い、様々な混合気において消炎付近での火炎先端温度が約1200℃であることを明らかにした。このことから、渦流によって燃焼範囲が拡大するのは、ルイス数効果や圧力拡散等の効果によって火炎先端が増加することに起因することが判明した。また、渦流による高速熱伝達を利用することで、出力20Wを超える小型燃焼器(5<m3)の開発に成功し、最大で176mW/cm3のエネルギー密度を記録した。加えて、燃料・空気供給を含む全てを自立した小型自立発電システムの構築にも成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, gaseous temperature measurements have been made on the flames propagating the vortex flow. It was found that the flame tip temperature is about 1200degC for various fuel/O2/inert mixture, which indicates that the extension of the flame propagation limits in the vortex flow is attributed to the flame temperature increase through the effects of Lewis number or pressure diffusion. The miniature power system has also developed utilizing the heat transfer enhancement by the vortex flow. As a result, over 20W output was obtained with miniature vortex combustion power system of 5<m3, which energy density attained 176mW/cm3. Furthermore, autonomous power system has been developed on which all electrical systems have been exerted by the part of generated power.

研究分野：燃焼工学

キーワード：次世代小型発電システム 渦流燃焼 可燃範囲 熱伝達 小型発電システム

1. 研究開始当初の背景

近年、小型高出力の電力源が必要とされる中、小型燃焼器が注目を集めている。研究代表者は(1)渦流を用いると従来の火炎伝播限界値である「可燃限界」を超えた条件で火炎が伝播可能となること、(2)渦流を利用すれば、狭い流路でも乱流に近い壁面熱伝達が達成されることを明らかにし、さらに(3)基礎研究の結果を応用し、供給・冷却を完全自立とした「小型渦流燃焼発電システム」を構築した。

2. 研究の目的

本研究では、(1)渦流を用いると従来の火炎伝播限界値である「可燃限界」を超えた条件で火炎が伝播可能となる現象に対して、渦中を伝播する火炎先端の温度・化学種(活性種・安定種)濃度・速度分布の測定を行い、いずれの因子が燃焼限界拡張に支配的であるかを特定してその機構を明らかにする。

さらに(2)渦流を利用すれば、狭い流路でも乱流に近い壁面熱伝達が達成される現象に対し、ガス温度や被加熱面温度、壁面付近での流速分布を測定して詳細な伝熱解析を行い、渦流による狭小な空間での高速熱伝達機構を明らかにする。

同時に、(3)基礎研究の結果を応用し、供給・冷却を完全自立とした「小型渦流燃焼発電システム」を構築し、エネルギー密度 1.0 MWh/m³ を目標としてシステム試作・評価を行う。

3. 研究の方法

(1)渦流による火炎伝播限界拡張機構の解明：ラマン分光計測などにより、伝播限界近傍での火炎先端の化学種・温度を非接触で計測する。

(2)渦流による高速熱伝達機構：ガス温度や被加熱面温度の測定により詳細な伝熱解析を行う。

(3)小型渦流燃焼器の開発：基礎研究の結果を応用し、供給・冷却を完全自立とした「小型渦流燃焼発電システム」を構築する。最終年度は特に一切の電源を不要とする自立型発電システムの構築に取り組む。

4. 研究成果

(1)渦流による火炎伝播限界拡張機構の解明：ラマン分光計測とOH-LIFを用いることで、伝播限界近傍での火炎先端の化学種・温度計測を行った結果、伝播する火炎先端の温度が、いわゆる層流火炎の形成限界における火炎温度「限界火炎温度」より200Kほど低いことが判明した。

この事実に加え、n-C₄H₁₀/Air 混合気と i-C₄H₁₀ 混合気を実験を行った結果、火炎伝

播限界に優位な差が認められた。この2つの混合気において異なる燃焼学的パラメータは化学的着火遅れであり、このことから、ボルトックスバースティング現象の発生限界は、火炎先端の着火温度に依存していることが判明した。

(2)渦流による高速熱伝達機構：ガス温度や被加熱面温度の測定により詳細な伝熱解析を行った結果、メタン/空気混合気において最も熱伝達が促進されることが判明した。メタン/空気混合気は、同一の発熱量条件では最も混合気流量が多く、つまりこのことから、やはり渦流燃焼器では混合気の接続方向への吹き出し速度が熱伝達を支配していることが明らかとなった。

(3)小型渦流燃焼器の開発：基礎研究の結果を応用し、供給・冷却を完全自立とした「小型渦流燃焼発電システム」の構築を試みた。

始めに、基礎研究の結果、渦流による熱伝達促進の結果、壁面温度は急激に増加する一方でガス温度は急激に低下するため、結果的に火炎温度が上昇しきる前にガス温度が低下し始め、燃焼効率の頭打ち繋がっている可能性があることが示唆された。そこで、壁面温度を増加させ、火炎温度の上昇を促すべく、伝熱面を制約して抜熱量をコントロールする、図1のような伝熱制御型燃焼器の提案を行った。

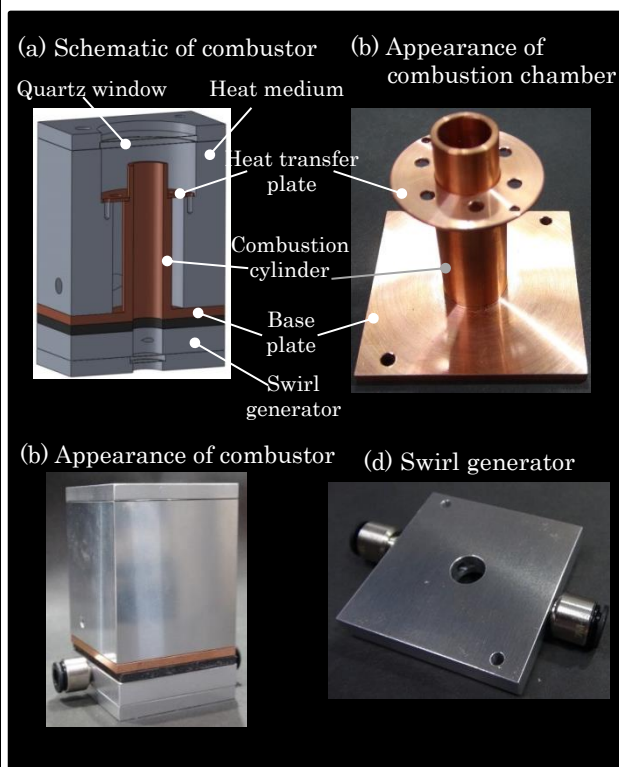


図1. 伝熱制御型小型渦流燃焼器 外観

この燃焼器では、熱電素子を貼り付け、抜熱する部が、燃焼室である燃焼筒と切り離されており、燃焼熱は図 1 右上に示されるベースプレート (Base plate) と伝熱板 (Heat transfer plate) のみを通じてヒートメディアに伝えられる。温度測定の結果、伝熱制御型では伝熱面積が狭いために燃焼筒の温度が最高 450°C にまで上昇していることが確認された。なお、従来型での壁面温度は最高でも 250°C 程度であった。

この伝熱制御型の燃焼器での発電結果を図 2 に示す。図中、横軸は不可抵抗値、縦軸は出力である。図のように、従来型では最高出力が 18 W であるのに対して、伝熱制御型では 20 W にも達する結果と成った。従来型でさえ出力は世界最高であったが、それを 10% 上回る出力が得られる結果と成った。

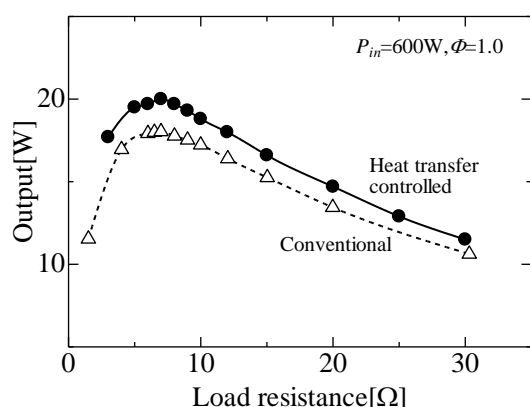


図 2. 小型渦燃焼発電システムの出力

上記の小型渦燃焼発電システムでは、出力が高いために、出力の一部で空気供給系や熱電素子冷却系などの補器を稼働させ、完全自立系を構築できる可能性がある。そこで、本研究では、完全自立系の構築を試みた。

図 3 は構築された完全自立小型渦燃焼発電システムである。図 3 (A) のように、ボタンポンプのみ必要で、その他の外部機器を一切必要としない。内部は (B) に示されているが、その中央に内径 10mm の小型渦燃焼器が設置されている。空気はターボブロアより供給され、燃料であるボタンと混合された後に小型渦燃焼器に供給され、イグナイタで着火することで (C) のような渦硫化鉛が形成される。

本システムにおける正味の出力は 10 W である。小型燃焼発電システムとしては、触媒による出力 10 W のシステムが存在しているが、補器は全て外部電源による。補器を稼働させれば、出力は 1 W もえられるかどうか不明であるようなレベルであり、補器を稼働した上、完全自立で 10 W の出力が得られるような装置は、世界的に見ても本装置に限られている。

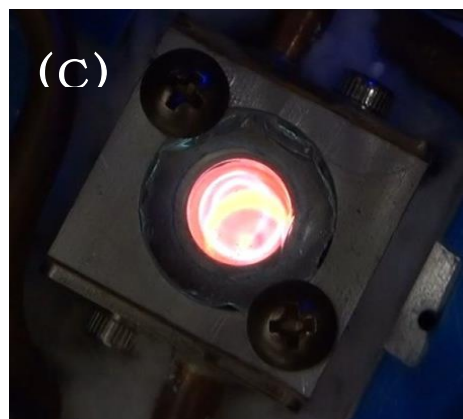
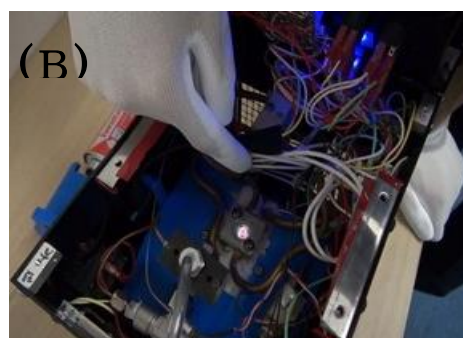


図 3. 完全自立小型渦燃焼発電システム

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)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Daisuke SHIMOKURI, Yuuki TAOMOTO, Ryosuke MATSUMOTO, “Development of a powerful miniature power system with a meso-scale vortex combustor”, Proceeding of the Combustion Institute, Vol. 36, pp. 4253-4260 (2017), 査読有り.
2. Set naing, Daisuke SHIMOKURI, “Laser Measurement on Oxy-fuel Flame with Optically Accessible Tubular Flame Burner”, The Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol. 17, pp. 204-209 (2017), 査読有り.

[学会発表] (計 3 件)

1. 【招待講演】 Daisuke SHIMOKURI,
“Autonomous Power System Using Small
Scale Vortex Combustor”, The 17 the
International conference on Micro and
nanotechnology for power generation
and energy conversion application, Nov.
14-17, 2017, Kanazawa Japan.
2. Daisuke SHIMOKURI, Yuuki TAOMOTO,
“Development of Powerful Miniature
System with Heat Transfer Controlled
Vortex Combustor and Thermo Electric
Device”, The 17 the International
conference on Micro and nanotechnology
for power generation and energy
conversion application, Nov. 14-17,
2017, Kanazawa Japan.
3. 埜本優樹, 下栗大右, 佐藤浩之, 横尾直
樹, ” 小型渦流燃焼発電システムにおけ
る伝熱の制御による高効率化”, 第 55
回燃焼シンポジウム, 2017 年 11 月 13~15
日富山.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下栗 大右 (SHIMOKURI DAISUKE)
広島大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40432687