

令和元年6月20日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06114

研究課題名（和文）マイクロコンバスターを利用した超小型自立パワーユニットに関する研究

研究課題名（英文）A study on a micro autonomous power unit with a micro-combustor

研究代表者

高橋 周平（Takahashi, Shuhei）

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：40293542

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、これまでに開発した触媒燃焼を利用したマイクロコンバスターと熱電素子を利用して発電を行う機構に、発電した電力の一部を用いて駆動する燃料供給系および空気供給系を組み込むことで、完全自立した超小型パワーユニットを作成し、その性能評価を行った。その結果、本システムは30分以上にわたり作動し、熱出力11.5Wに対して、正味電力224mW、最終変換効率で1.95%という、超小型ながら世界最高レベルの変換効率を記録した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多様なエネルギー源を想定することは、安全・安心な社会を構築するために不可欠であり、特に個人で携帯可能なパワーユニットは、非常時などの生存確保のような用途だけでなく、スポーツや介護現場などへのスピンオフも期待できる。本研究においては、触媒燃焼を利用することで、裸火でない比較的 안전한燃焼形態を実現し、かつ小出力の熱源として機能させており、汎用性の広い利用が見込まれる。

研究成果の概要（英文）：We developed a self-standing micro-power unit with coupling a microcombustor, thermoelectric modules, a fuel tank with a valve and an air supply device, to investigate its performance. The air supply system was driven by a part of electricity from the TE modules. For the thermal input of 11.5W, the net output of 224mW was recorded, which correspond to the final conversion efficiency of 1.95%.

研究分野：燃焼工学，熱工学

キーワード：触媒燃焼 熱電素子 マイクロコンバスター

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災の際に、避難所などでは電力、暖房などの基本的なインフラ設備の破壊による混乱が長期間にわたって見られた。これらは、地震・津波などによる発電所・ガスラインなどの停止によるものであり、本格的な復旧には時間がかかることは不可避である。しかしながら、被災者にとってとりあえず必要な電力・暖房能力は、携帯電話やラジオなどの小電力信機器の駆動、および個人ベースで暖をとるための小出力規模である。このため、大規模発電所による集中的な供給能力の復旧を待つのでなく、むしろ個人ベースでの超小型分散電源システムでこれらのエネルギーを供給できることが、被災直後の減災、安心・安全に大きく寄与すると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、これまで提案者らが開発を行ってきた多孔質触媒層を有するマイクロコンバスターを利用し、これを個人が携帯して使用できる熱エネルギーと電気エネルギーの供給装置としてのマイクロコジェネの応用可能性評価 (Feasibility study) および、その開発を行う。提案者らはこれまでに、粒径 $1\mu\text{m}$ の白金粉末を水と混濁することにより、スラリー状のペーストを作成し、これをサブミリオーダー (管内径 $0.4\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$) のムライトセラミックス管内に塗布・乾燥させた後、可燃性予混合気を供給して表面反応により焼結させることで、緻密な3次元構造を持つ多孔質触媒層を成長させる手法を開発し、これを適用した燃焼器の燃焼特性などを調べてきた。この結果、従来の微小燃焼器に比べて熱出力規模が $1/10$ 以下である $5\text{W} \sim 15\text{W}$ 程度のマイクロコンバスターの開発に成功した(図1)。本マイクロコンバスターは、 1000K 以上の排気温度が利用できる点熱源として高いエクセルギーを有するため、電気エネルギーなどへの変換が期待できる。しかしながら、従来の熱機関をダウンサイジングした場合は、代表スケールの減少に伴い各要素間での温度勾配が大きくなりすぎ、熱効率が大きく低下しサイクルが成立しない。そこで、スケール効果が表れにくい、熱電素子を用いた発電に注目し、エネルギー変換を行う。

現在、Bi-Te 型の熱電モジュールは、量産品が入手しやすく、またその性能も ZT 値が室温付近で 1 程度あるため、素子自体では 5% 程度の変換効率が見込まれる。これまでの研究において、提案者は 13W 級マイクロコンバスターと Bi-Te 型熱電モジュールを組み合わせ、最大 4.2% の変換効率を達成しており、この値は世界最高レベルである。これにより約 500mW 程度の電力が得られ、また電気エネルギーに変換されない熱量は、そのまま保温用などの熱源として利用できるため、携帯用コジェネとしてシステム化すれば、自然災害などの被災時の初期エネルギー源として、個人ベースでの災害時における危機対応能力の向上につながると考えられる。

3. 研究の方法

初年度で、スケール解析による触媒アシスト超過エンタルピー燃焼のモデル化と各要素 (燃焼器、熱電モジュール、プロア、駆動回路) の動作特性と、出力/消費電力の把握を行う。これらの結果をもとに、燃料流量をパラメータとして、発電量—消費量の関係を調べ、自立作動する条件のマップを得て、最適動作点の検討を行う。

また、次年度以降は、各要素を統合して超小型自立パワーユニット試作機を作製し、実機での作動範囲出力特性および最適点の把握を行う。また、着火方式の検討および停止時からの立ち上げシーケンスの検討を行い、携帯型マイクロコジェネとして停止状態から最適状態まで起動できるシステムを構築する。

4. 研究成果

装置の概略図を図1に示す。実験装置は空気および燃料供給系、燃焼器、発電装置からなる。燃料の供給には小型かつ蒸気圧で供給可能であることから、市販のガスライター用の燃料タンクを利用している。また燃料にはブタン、プロパンの混合ガス (混合比 65 : 35) を用いている。空気はシステム内で発電した電力の一部を用い、圧電素子で駆動されるマイクロプロアを用いて供給している。空気流量は、マイクロプロアへの印加電圧を変化させることによって調節した。マイクロコンバスターは、内径 1.5mm 、外径 2.5mm のムライトセラミックス ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) 管の内部に Pt を多孔質状に焼結し作製している。本マイクロコンバスターにおいては、触媒の表面反応を利用することで未燃ガスを余熱し、気相での燃焼を維持する。

実験では、燃焼器と熱電モジュールを組み合わせて発電装置を作製した。発電装置の加熱部、および放熱部は銅で作製し、図2に示すように

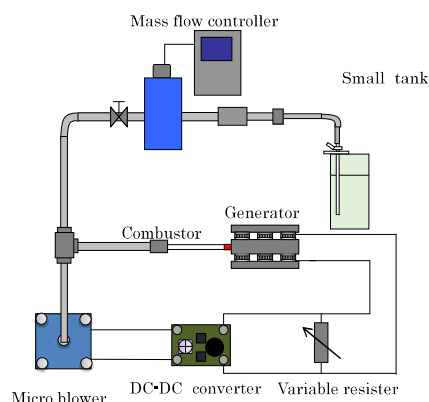


図1 触媒燃焼式発電システム概要

板状の放熱部 (4mm×34mm×54mm) に柱状の加熱部 (4mm×4mm×18mm) が組み込まれている。加熱部と放熱部の間に Bi-Te 系熱電半導体 1MD04-017-12 (RMT Ltd) を 6 個取り付けた。この熱電モジュールは直列につながれており、熱電モジュールと加熱部、および放熱部は熱伝導グリスを用いて密着させている。加熱部には非貫通の穴が開いており、この空洞にマイクロコンバスターを差し込むことで加熱部を高温に保ち、放熱部に氷を置くことで冷却させる。この温度差により熱電モジュールで発電を行う。マイクロプロアは発電装置が出力する電圧では駆動できないため、昇圧型 DC-DC コンバータモジュール (ストロベリーリナックス社製:LM2735) でマイクロプロアの駆動に必要な電圧まで昇圧させて実験を行った。発電装置の回路には発電装置と DC-DC コンバータ、および可変抵抗器 (日本電産コパル電製:M-22E10-050 200) が並列につながれている。

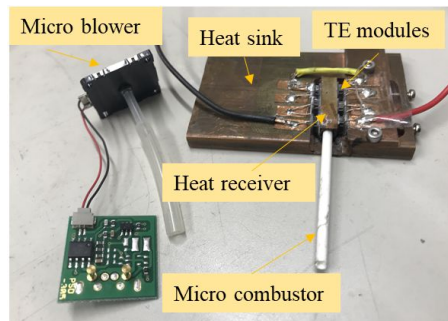


図2 発電要素部およびマイクロプロア

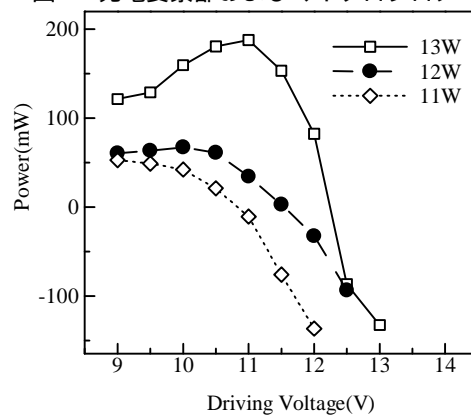


図3 投入熱量とマイクロプロア駆動電圧を変化させたときの正味出力の予測値

要素試験として、マイクロプロアでの消費電力と発電装置での出力電力を計測し、パワーユニットのシステム稼働時における正味出力の推算を行った。図4は発電した電力でマイクロプロアを駆動させたときの予想される正味電力の変化を示している。この図から投入熱量 11W から 13W の範囲において、自立状態では最大で 188mW 程度の正味出力が得られることが予想された。また、さらに投入熱量を上げるとより高い出力が得られることが予想されるが、過去の実験において 13W より高い投入熱量で発電試験を行った際に、熱電変換素子の高温側温度が高温になり破損したため、投入熱量 13W 以下で発電試験を行う。

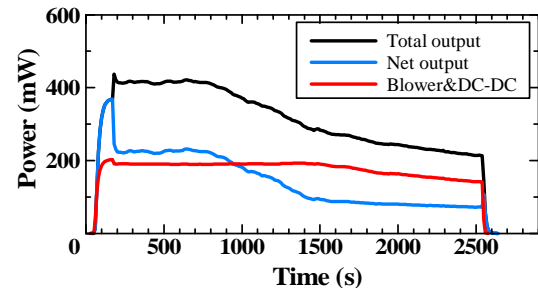


図4 連続燃焼時の総電力、正味電力および空気供給系消費電力

マスフローコントローラを制御装置としてではなく、流量計としてのみ利用する自立発電試験を行った。実験はタンクに付属しているバルブの開度を固定した状態で行った。その結果を以下に示す。

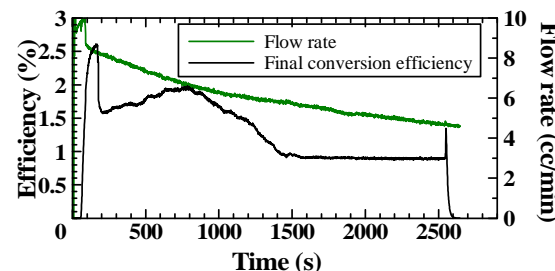


図5 連続燃焼時の燃料流量および最終発電効率の変化

図5において 200s 付近で自立発電を開始したのち 800s 付近まで 220mW 以上の正味出力を安定して得られたが、その後徐々に出力が低下していくことが分かる。これは、マスフローコントローラによる流量制御を行っていないため、図6に示すような燃料流量が減少することに伴って 800s 付近の前後で過濃燃焼から希薄燃焼に遷移し、発熱量が空気流量依存から燃料流量依存に変わったことが原因として考えられる。また、この過濃から希薄に変わる点は燃料と空気が過不足なく燃える当量比 1 であり、発電効率が最も高くなる場所である。そのときの燃料流量は 11.5W 相当の 6.79cc/min であり、可変抵抗で消費された正味の出力は 224mW であった。マスフローコントローラによる燃料流量制御がない場合でも自立発電を行うことができたが、最適作動点の安定性は不安定であり、制御した場合と比較して高い発電量を得られる時間が短くなるという課題があることがわかった。また、1500s 付近から正味出力の減少速度が緩やかになっているが、これは図3で示すように発電量の低下に伴い、DC-DC コンバータへの印加電圧が下がり、十分に昇圧できなくなったことで

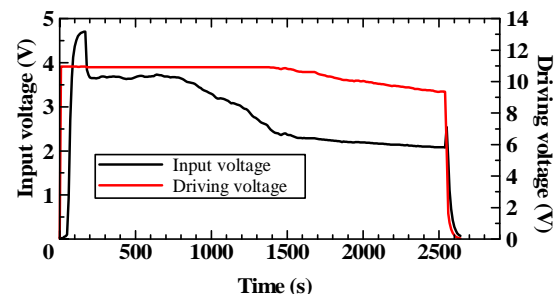


図6 連続燃焼時の発電部出力電圧およびマイクロプロア駆動電圧の変化

また、1500s 付近から正味出力の減少速度が緩やかになっているが、これは図3で示すように発電量の低下に伴い、DC-DC コンバータへの印加電圧が下がり、十分に昇圧できなくなったことで

ブローの駆動電圧が下がったために空気流量が減少し、総発電量の低い別の安定点に移行したためと考えられる。

以上、マスフローコントローラによる制御がない場合でも 30 分以上の自立発電が可能であるとわかったが、開度を固定したバルブのみで流量調整を行った自立状態では燃料流量が時間経過に伴って減少していくため、マスフローコントローラの制御がある場合と比較して高い発電量を得られる時間が短くなったが、自立状態における最終変換効率は最高で 1.95% を記録し、そのときの正味出力 224mW は 10 数 W 級の熱出力クラスでは世界最高水準となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

1. 中野貴文, 小林芳成, 高橋周平, 微小燃焼器を用いた完全自立パワーユニットの動作特性, 熱工学コンファレンス 2018, 2018.

2. K. Higuchi, T. Nakano and S. Takahashi, Development of Portable Power Unit with Catalytic Micro-combustor, PowerMEMS 2017, 2017

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<https://www1.gifu-u.ac.jp/~comblab/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号 (8 桁)

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。