

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2022

課題番号：20K22390

研究課題名（和文）火炎輻射直接発電技術の創成 - 火炎輻射の制御と変換の新学理探究 -

研究課題名（英文）Study on direct electricity generation from flame radiation -Research of new theory for control and conversion of flame radiation-

研究代表者

佐藤 大輔 (Sato, Daisuke)

長岡技術科学大学・工学研究科・講師

研究者番号：30883897

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、クリーンな未利用エネルギーであるバイオガスとマグネシウムに着目し、これらの燃焼によって形成させる火炎の輻射から直接電力変換する技術として、2種類のコンセプトを提案し技術ポテンシャルを調査した。(1) バイオガスの酸素燃焼によるマイクロフレイムと熱電変換を組み合わせた超小型燃焼発電システムを試作し、IoT機器駆動への応用に十分な電力(>10 mW)が得られた。(2) マグネシウム燃焼火炎の輻射スペクトルは結晶シリコン太陽電池の発電感度スペクトルと傾向がよく一致した。太陽電池に入射する放射強度が同じ場合、太陽光よりもマグネシウム燃焼火炎輻射の方が高い光電変換効率を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまで着目されていなかった火炎輻射からの直接発電のポテンシャルを、未利用のカーボンフリー/カーボンニュートラル燃料の燃焼を用いて実証した。本研究で得られた知見は、燃焼エネルギーの新たな利用形態の可能性を示すものとして学術的に意義があり、クリーンな未利用エネルギーを有効活用する新たな技術として脱炭素化社会への早期転換に資するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we examined direct electricity generation from flame radiation. Potential for two types of concepts with combustion of biogas and magnesium, which are carbon free/neutral and unutilized fuels, were clarified. (1) Small-scale combustion-driven power system, which consists of micro flames formed by oxygen combustion of biogas and thermoelectric devices, achieved generated electricity of >10 mW, demonstrating a potential for applying to independent power supplies such for IoT devices. (2) Spectral tendency of irradiance of radiation emitted from magnesium combustion flame was similar to spectral response of a crystalline silicon solar cell, resulting in that photoelectric conversion efficiency became higher than the sunlight case under same irradiance condition on the solar cell.

研究分野：熱工学

キーワード：燃焼 火炎 輻射 <ふくしゃ> スペクトル バイオガス マグネシウム 熱電変換 光電変換

1. 研究開始当初の背景

燃焼は代表的なエネルギー生成技術であり、主流なアプリケーションとして、高温高压の気体を用いて回転エネルギーを作るガスタービンや高温燃焼ガスからの熱伝導・対流熱伝達によって温水や蒸気を作るボイラー等がある。一方、燃焼は“熱と光を発生する化学反応”と定義され、火炎から輻射<ふくしゃ>として放射されるエネルギーも存在する。しかし、これまで火炎輻射(可視発光+赤外放射)の直接的なエネルギー変換はほとんど着目されていない。

プロパンやブタンといった炭化水素燃料のエネルギー密度は、リチウムイオン電池等の化学電池のそれよりも2桁以上大きく[1]、燃焼エネルギーからの電力変換技術は大型の発電プラントのみならずIoT機器やMEMs等用の小型分散型電源として有望である。これらの小型機器の導入量は今後益々増加し、世界の全電力消費量に占める割合が極めて大きくなると見込まれている[2]。今後の脱炭素化社会の形成に向けて、従来の化石燃料の燃焼に替わる、二酸化炭素を排出しないもしくはカーボンニュートラルな未利用エネルギーの燃焼に基づいた新たな電力変換技術が求められている。

2. 研究の目的

以上の学術的・社会的背景から、本研究では、カーボンフリー/カーボンニュートラルな未利用エネルギーとしてバイオガスとマグネシウムに着目し、これらの燃焼によって形成させる火炎の輻射から直接電力変換する技術として、以下の2種類の構成を提案し技術ポテンシャルを明らかにする。

1. バイオガス燃焼による火炎輻射からの熱電変換
2. マグネシウム燃焼による火炎輻射からの光電変換

3. 研究の方法

バイオガス(気体)とマグネシウム(固体)を安定燃焼させるための燃焼器構成と燃焼条件(ガス噴出口径、みかけの当量比、燃料投入速度等)を探索する。その後、燃焼器と熱電変換素子もしくは光電変換素子を組み合わせた発電モジュールを製作し、発電量を測定する。発電モジュールの構造や発電性能を既存の類似技術と比較し、優位性と課題を見極める。

4. 研究成果

4.1 バイオガス燃焼による火炎輻射からの熱電変換

バイオガスは有力なカーボンニュートラル燃料であるが、不燃性の二酸化炭素成分が25~50%を占めており着火しにくいのが欠点である。この課題は燃焼場の酸素濃度を高める酸素富化燃焼で改善できることが知られており、この燃焼方法は対向流拡散燃焼によって容易に実現可能である。そこで本研究では、図1に示すように、対向させたバーナーからバイオガスと酸素を逆向きに噴出させてバーナー間に火炎(マイクロフレイム)を形成し、その周囲を4枚のBi-Te型熱電変換素子で被覆する発電モジュール構成とした。燃焼場からの熱は3つの伝熱形態によって熱電変換素子に伝えられる(マイクロフレイムからの熱ふく射、対向流によって形成される対流、熱ふく射と対流で加熱されたバーナーからの熱伝導)。この構造により、発電システム外部への熱損失を最小限にしつつ、加熱されたバーナーを介して燃焼場に供給される未燃ガスを加熱することで燃焼の促進が期待できる。火炎の安定性と構成材料の耐熱温度を考慮して発電モジュールの設計仕様を決定し、図2に示す発電モジュールを試作した。ヒートシンクを含めた発電モジュールの体積は2.54 cm³であり、この値はこれまで報告されている燃焼と熱電変換を組み合わせた発電システムの体積よりも1~2桁小さい。試作発電モジュールを図3に示す実験装置に組み込み、ガス流量条件を変え

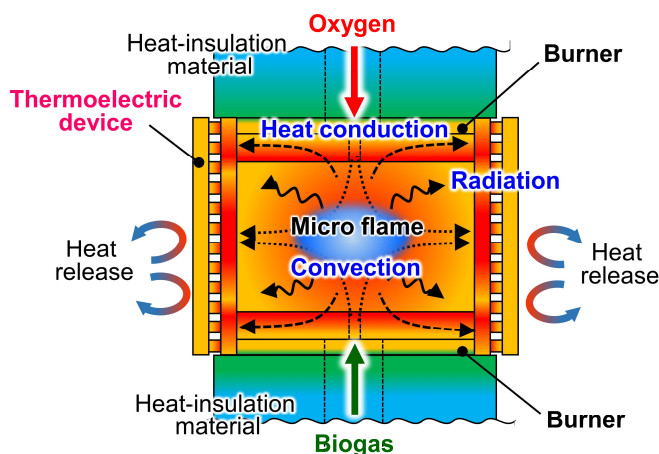


Fig. 1 Conceptual image of micro combustion-driven power system and heat transfer mechanism from micro flame to thermoelectric devices.

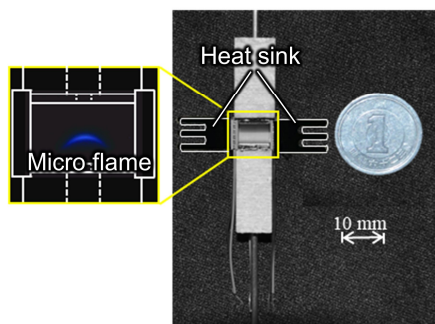


Fig. 2 Photograph of prototyped combustion-driven power system.

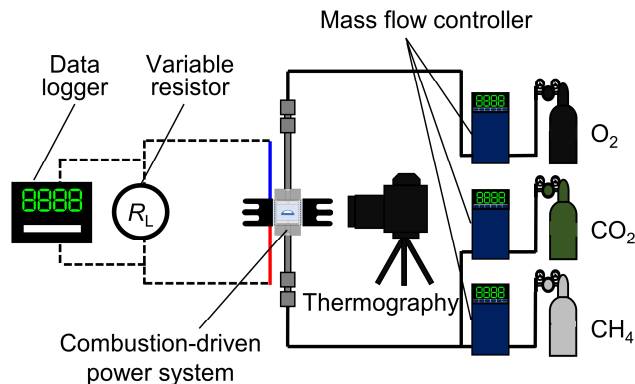


Fig. 3 Schematic of experimental setup.

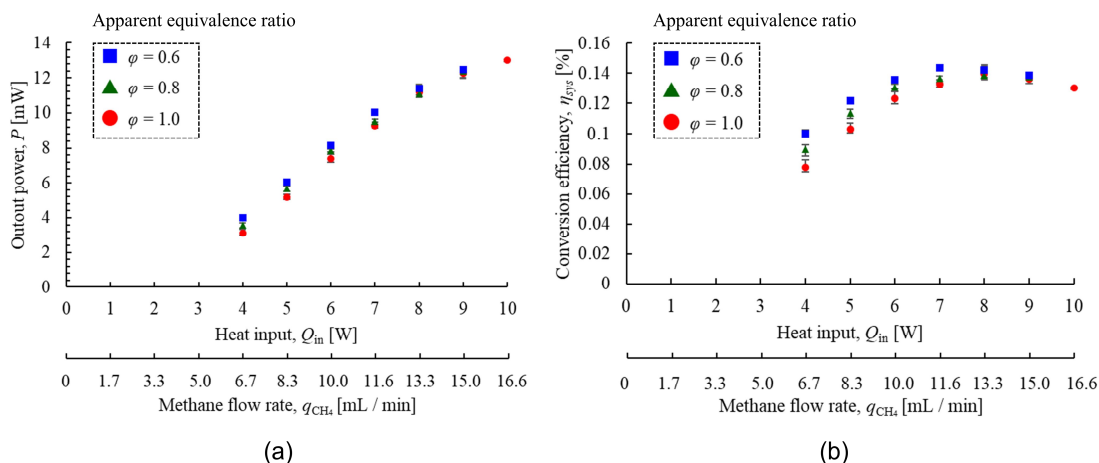


Fig. 4 Relationship among heat input, apparent equivalence ratio, and power generation performance. (a) Output power. (b) Conversion efficiency.

ながら発電性能を測定した。燃料のバイオガスは主成分であるメタンと二酸化炭素を流量比率 1:1 で混合させたものとした。図 4 に投入熱量（メタン流量）、みかけの当量比と発電特性（発電量、電力変換効率）の関係を示す。なお、発電量は、直列に接続した 4 枚の熱電変換素子の合計出力電圧とそれに接続した最適負荷抵抗の値から計算し、電力変換効率は発電量とメタンの低位発熱量（ 36.06 MJ/m^3 ）の比率として定義した。発電量（図 4(a)）は投入熱量が大きいほど、またみかけの当量比が小さい（燃焼場の酸素濃度が高い）ほど増加し、みかけの当量比の影響は投入熱量が小さいほど顕著であった。これは、低投入熱量条件で酸素富化による燃焼促進効果が大きいことを示唆している。一方、電力変換効率（図 4(b)）はある投入熱量でピークを示し、最適な投入熱量があることがわかった。本研究で検討した投入熱量およびみかけの当量比の条件範囲において、投入熱量 10 W ・みかけの当量比 0.6 の時に最大発電量 13 mW 、投入熱量 7 W ・みかけの当量比 0.6 の時に最大電力変換効率 0.14% が得られた。この発電性能は、センサーや無線通信機器等の必要電力（ $\sim 10 \text{ mW}$ ）を賄うのに十分である。この時の発電モジュール体積当たりの発電量（出力密度）は 5.12 mW/cm^3 であり、これまで報告されている熱電変換素子を自然空冷する方式の燃焼 - 熱電変換発電システムの中で最も高い値を記録した。

4.2 マグネシウム燃焼による火炎放射からの光電変換

図 5 に示すようにマグネシウムは燃焼時に太陽光と同等の激しい発光を生じる。本研究では、マグネシウム火炎放射（発光）スペクトルを測定し、代表的な光電素子である太陽電池の分光感度スペクトル（発電感度スペクトル）と比較することで高効率発電の可能性を明らかにした。図 6 にマグネシウム火炎放射、太陽光の分光放射強度および結晶シリコン太陽電池の分光感度を示す。各放射の分光放射強度と太陽電池の分光感度は、傾向を比較しやすくするため最大値で正規化している。結晶シリコン太陽電池は現在最も普及している太陽電池である。太陽電池の理論短絡電流値は、



Fig. 5 Radiation emitted from magnesium combustion flame

$$I_{sc} = \int_{\lambda} E(\lambda) S(\lambda) A d\lambda \quad (1)$$

の式から計算される。ここで、 I_{sc} [A]は太陽電池の短絡電流、 $E(\lambda)$ [W/(m²·nm)]は光源（マグネシウム火炎放射もしくは太陽光）の分光放射強度、 $S(\lambda)$ [A/W]は太陽電池の分光感度、 A [m²]は太陽電池の面積である。この式は、輻射スペクトルと光電変換素子の分光感度の傾向が一致しているほど高い発電量が得られることを意味している。この結果から、太陽光スペクトルよりもマグネシウム火炎放射スペクトルの方が結晶シリコン太陽電池の分光感度と傾向がよく一致しており、高効率発電の可能性が示された。

マグネシウムリボンを連続燃焼させる透明な燃焼装置を試作し、その外壁に取り付けた結晶シリコン太陽電池の発電特性（電流 - 電圧特性）と太陽電池受光面上の火炎放射の分光放射強度を連続測定した。太陽電池の変換効率は次式で定義される。

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \cdot A} = \frac{P_{max}}{A \int_{\lambda} E(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

ここで、 η は変換効率、 P_{max} [W]は太陽電池の電流 - 電圧特性から得られる最大発電量、 A [m²]は太陽電池面積、 $E(\lambda)$ [W/(m²·nm)]は光源（マグネシウム火炎放射もしくは太陽光）の分光放射強度である。太陽電池受光面上の放射強度 E が等しい場合、マグネシウム火炎放射下での変換効率は疑似太陽光下でのそれよりも 2.7 倍高い値を示した。このことから、結晶シリコン太陽電池はマグネシウム火炎放射からも高効率に発電可能であることが示された。

今後は、再生可能エネルギーに基づいたマグネシウムの還元方法や、二酸化炭素雰囲気化での燃焼とメタネーションへの応用の可能性を探り、カーボンニュートラルなマグネシウムサイクルの実現に資する新規技術の研究を行う。

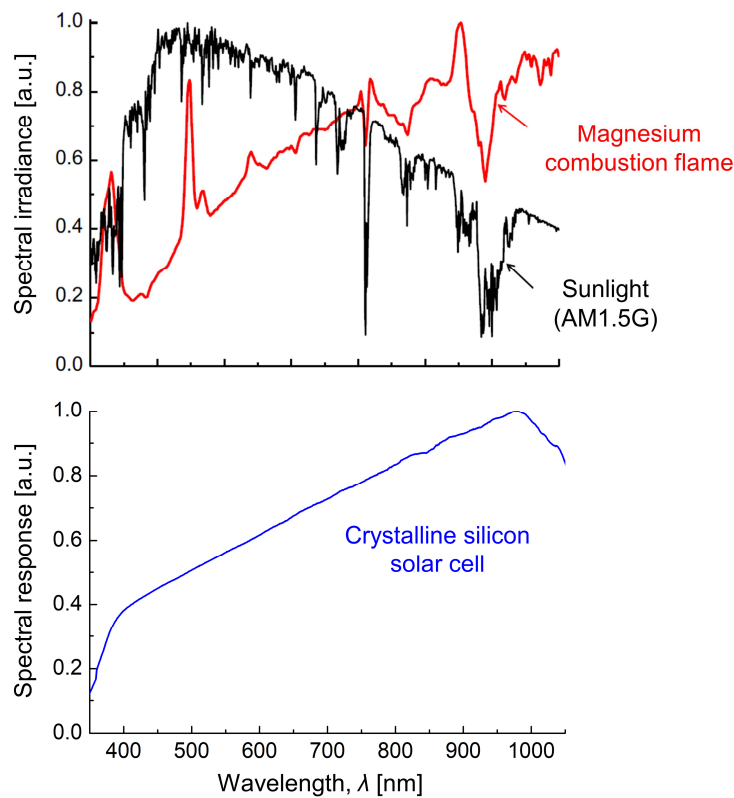


Fig. 6 Measured spectral irradiance of radiation emitted from magnesium combustion flame and spectral response of crystalline silicon solar cell.

参考文献

- [1] A. C. Fernandez-Pello, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 29, no. 1, pp. 883–899, 2002.
- [2] M. Haras and T. Skotnicki, *Nano Energy*, vol. 54, pp. 461–476, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Daisuke Sato, Shuta Nakachi, Kaito Honda, Keisuke Obu, Toshiyuki Katsumi, Satoshi Kadowaki	4. 巻 17
2. 論文標題 Experimental analysis on micro diffusion flames formed by oxygen combustion of H ₂ -CO ₂ mixture using counterflow burners	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 22-00012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jtst.22-00012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤 大輔, 本田 海都, 塩澤 宥哉, 勝身 俊之, 門脇 敏
2. 発表標題 火炎輻射の熱特性解明と直接発電への応用
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 仲地 秀太, 本田 海都, 小林 剛也, 佐藤 大輔, 勝身 俊之, 門脇 敏
2. 発表標題 ガラス管で被覆されたバイオガス - 酸素マイクロ対向流拡散火炎の燃焼特性
3. 学会等名 2021年度 日本伝熱学会 北陸信越支部 秋季セミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本田 海都, 佐藤 大輔, 仲地 秀太, 勝身 俊之, 門脇 敏
2. 発表標題 熱電変換素子で被覆されたバイオガス - 酸素マイクロ対向流拡散火炎の燃焼特性
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 大輔, 仲地 秀太, 本田 海都, 勝身 俊之, 門脇 敏
2. 発表標題 対向流拡散燃焼に基づく小型燃焼発電システムの開発
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仲地 秀太, 高村 昌樹, 佐藤 大輔, 勝身 俊之, 門脇 敏
2. 発表標題 バイオガス - 酸素対向流拡散マイクロフレームからの熱電変換性能評価
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仲地 秀太, 高村 昌樹, 佐藤 大輔, 勝身 俊之, 門脇 敏
2. 発表標題 対向流拡散燃焼に基づく超小型燃焼発電システムの実現可能性検証
3. 学会等名 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------