

メタマテリアルの熱輻射吸収がもたらす熱電変換素子の出力向上
Improvement of thermoelectric device performance
achieved by thermal radiation absorption of metamaterial

東京農工大, [○](B)勝俣 翔平, 久保 若奈
TUAT, [○]Shohei Katsumata, Wakana Kubo
E-mail: w-kubo@cc.tuat.ac.jp

近年、環境問題や資源問題などによるエネルギー再利用の需要が高まっている。中でも熱として廃棄されるエネルギーを電気エネルギーに変換可能な熱電変換素子は、クリーンなエネルギー源という理由で注目を集めている。^[1] 熱電変換素子の出力は素子に与える温度勾配によって決定されるため、高い出力を得続けるためには温度勾配を維持する必要がある。そこで我々は、熱電変換素子の一部に熱輻射を吸収して発熱するメタマテリアルを形成し、熱電変換素子内の温度勾配を継続的に維持すれば熱電変換素子の出力を高めることができるのではないかと考えた。それを実証する為に本研究では、熱輻射を吸収するメタマテリアルを設計した。そしてそのメタマテリアルがどれだけの熱を発生するのか、またどの程度の熱電変換出力が得られるか、シミュレーションによって検証した。

シミュレーションで用いた素子は、熱電変換材料であるビスマステルル (Bi₂Te₃) 上の一部に、メタマテリアルを構成する銀フィルム (Ag film), フッ化カルシウム (CaF₂) 層を積層し、その上に、銀ナノディスク (Ag nanodisk) を有する。素子の模式図を Fig. 1 に示す。この

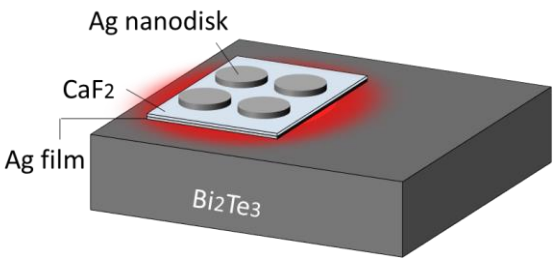


Fig. 1 Schematic of thermoelectric device with metamaterials which absorb thermal radiation.

素子上のメタマテリアルは、熱輻射を吸収して磁場共鳴を励起する。その結果、磁場共鳴の損失の一部が熱となる。発生した熱は Bi₂Te₃ に伝搬し、Bi₂Te₃ 膜内で温度勾配が発生することで起電力が生じる。メタマテリアルは 500 K の黒体の熱輻射スペクトル域に吸収特性を有する様に設計した。(Fig. 2) メタマテリアルの吸収スペクトルは有限要素法 (FEM) によって計算した。得られた吸収スペクトルは、波長 6.8 μm で吸収率 88.9% を示し、500 K の黒体の熱輻射の一部を吸収することを確認した。

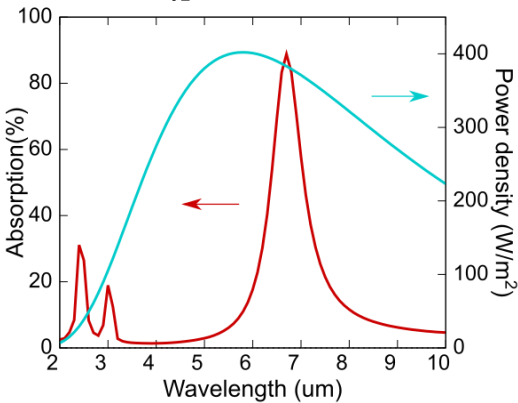


Fig. 2 Calculated absorption spectrum of the metamaterial on a Bi₂Te₃ film (red curve), and blackbody radiation spectrum at 500 K (blue curve).

次に 500 K の黒体輻射を吸収した際にメタマテリアルが生成する局所熱量と、その局所熱量によって発生する熱電起電力を計算した。^[2] メタマテリアルによって発生する熱量は、Eq. 1 で表される。

$$q(\mathbf{r}) = \frac{\omega}{2} \text{Im} \left(\varepsilon(\omega) \right) \varepsilon_0 |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 \quad \text{Eq. 1}$$

波長 2-10 μm の範囲において、求めた局所熱量は 0.321 K であった。さらに局所熱量から計算した熱電起電力および出力はそれぞれ 32.05 μV, 0.222 nW/cm² であった。(Table1)

Table1. Device characteristics of opto-thermoelectric device with metamaterial

Generated heat (ΔT) [K]	0.321
Voltage [uV]	32.05
Current [uA/cm ²]	7.223
Power density [nW/cm ²]	0.222

つまり、500 K の熱源に接触させた熱電変換素子の一部に熱輻射を吸収するメタマテリアルを適用すると、メタマテリアルの共鳴損失によって 0.321 K の温度勾配を熱電変換素子に与えることができ、メタマテリアルを持たない熱電変換素子よりも 0.222 nW/cm² 大きい出力が得られることが明らかになった。

[1] Ioannis Petsagkourakisa, Sci. Technol. Adv. Mater. (2018) **19**, 836-862.
[2] Y. Ishimori, T. Ishizaki, T. Ohtomo and A. Fuwa, J. Japan Inst. Metals (2004) **68**, 406-411.