

**黒体限界を超える高密度の光電流を生成可能な熱輻射光源／太陽電池一体型
熱光発電デバイスの開発に成功**
—太陽光や熱エネルギーの有効利用による脱炭素社会の実現に向けて—

概要

野田進 工学研究科教授、井上卓也 同助教、池田圭佑 同修士課程学生(研究当時)、浅野卓 同准教授等のグループは、高温の物体から生じる熱輻射^{注1)}から、黒体限界^{注2)}を超える高密度の光電流を生成することが可能な、熱輻射光源／太陽電池一体型・熱光発電デバイスの開発に成功しました。これは、太陽光(熱)や各種熱エネルギーを利用した、高出力密度かつ高効率な発電システムの実現に向けた重要な一歩であるといえます。

一般に、物質を高温に加熱すると、熱輻射が生じます。例えば、太陽、白熱電球など、加熱された物体が光る現象は、全て熱輻射に基づくものです。このような熱輻射と太陽電池を組み合わせた熱光発電^{注3)}は、エネルギーの有効利用を可能とする発電方式の1つとして、近年、注目を集めています。しかしながら、熱光発電には、いくつかの重要な課題が存在します。その一つが黒体限界と呼ばれるものです。これは、従来の熱光発電システムにおいては、熱輻射を一旦、自由空間(外部空間)へ取り出し、その後、太陽電池へ入射しますが、自由空間に取り出す際に、光源内で発生した熱輻射パワーを全部取り出すことが出来ず、最終的に太陽電池で生成される電力密度(今回、特に光電流密度に着目)が、熱輻射パワーを全て取り出す場合に比べ、一桁以上小さくなってしまおうという課題です^{注4)}。

研究グループは、高温(>1100K)の熱輻射体と、室温に保った太陽電池を、透明(高屈折率)基板を介して、光の波長よりも十分小さな距離(<140 nm)まで近づけた一体型熱光発電デバイスを開発することで、高温物体の内部で発生した高密度な熱輻射を、自由空間へ取り出すことなく、直接、太陽電池へと取り込むことを可能としました。その結果、従来方式に比べて5-10倍の密度の光電流を太陽電池で生成することに成功するとともに、最終的に黒体限界をも超える光電流密度の生成に成功しました。この成果は、太陽光や各種熱エネルギーを利用した発電システムの大幅な小型化・高出力化・高効率化の第一歩を達成したものと見え、将来の脱炭素社会の実現の鍵を担う技術としての展開が期待されます。

本研究成果は、2021年7月28日に、米国科学誌ACS Photonicsに掲載されました。本研究は、科学研究費基盤研究S(17H06125)のもとに行われました。

1. 背景

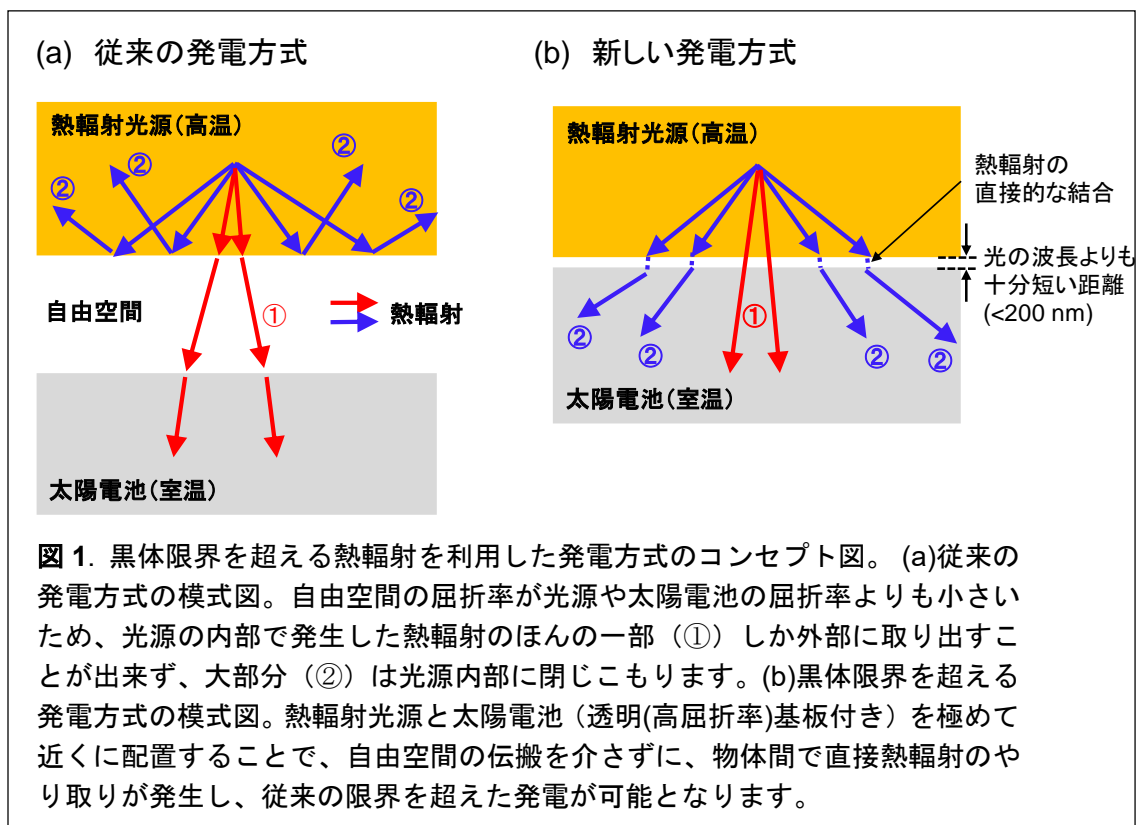
高温物体から生じる熱輻射は、簡便に様々な波長の光を生成できるという特長を有することから、冒頭で述べた発電への応用の他、赤外線を利用したガスセンサや環境センサなど、多岐にわたる用途に利用されています。しかしながら、通常の物体から生じる熱輻射は、以下の2つの課題を抱えています。1つ目の課題は、熱輻射が様々な波長成分の光を含んでいるため、特定の波長のみを利用する上記の用途においては、エネルギーの利用効率が極めて低くなってしまいます。2つ目の課題は、高温物体から自由空間へと取り出される熱輻射のパワー密度には、黒体限界と呼ばれる理論限界が存在することです。もし、これら2つの課題を解決することが出来れば、各種熱エネルギーから、応用上必要とされる波長の光を高強度かつ高効率に生成することが可能となるため、超小型・高効率発電システムを始めとして、多岐にわたる用途において、熱エネルギーを有効に活用できることが期待されます。

これまで研究グループでは、上記の2つの課題のうち、前者の課題の解決に向けて、物体を加熱したときに特定の波長の光のみを発生させる技術の開発等に取り組んできました。2012年（および2014年）には熱輻射を中赤外波長域の単一波長に集約^{注5)}（および高速変調^{注6)}）に成功しています。また、2016年には、太陽電池が受光可能な波長域（可視光から近赤外波長域）の熱輻射を効率良く出射可能な光源を開発し^{注7)}、2019年に、その熱輻射光源を用いた光電変換の初期実証に成功しました^{注8)}。

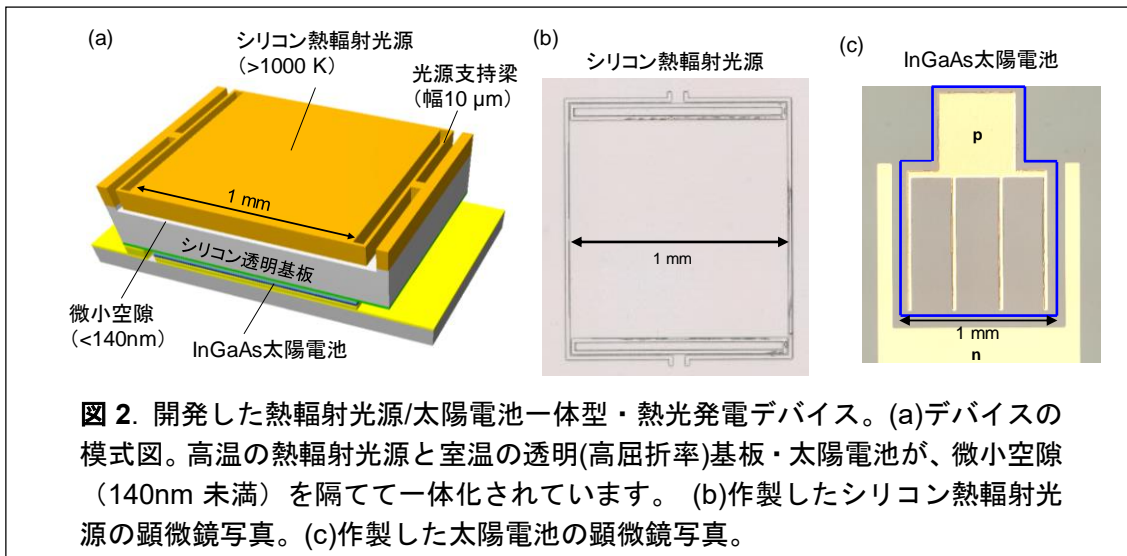
2. 研究成果

上述のような背景のもと、本研究では、後者の課題である、黒体限界を超える密度の光電流を生成することを目指しました。そのコンセプトを図1に示します。従来の熱光発電システム[図1(a)]では、高温の熱輻射光源の内部で発生した熱輻射のうち、ごく一部(①)のみが、自由空間へと取り出され、残りの大部分(②)は、熱輻射光源内に閉じ込められています。これは、自由空間に取り出すことが出来る熱輻射パワー密度の上限が、熱輻射光源内部の熱輻射パワー密度よりも遥かに小さいため、黒体限界と呼ばれるものです。この黒体限界は、物体中を伝搬可能な熱輻射パワー密度が屈折率の2乗に比例することに基づき、例えば、半導体材料（シリコンなど、屈折率3以上をもつもの）からなる熱輻射光源を考えた場合には、熱輻射光源内部で発生した熱輻射のうち、最大でも10分の1程度しか、屈折率1の自由空間に取り出すことが出来ません。

そこで、今回、図1(b)に示すような新たな発電システムを開発し、熱輻射光源と太陽電池を、透明(高屈折率)基板を介して、光の波長と比較して十分に短い距離まで近接させることにより、自由空間の伝搬を介さずに、熱輻射光源から太陽電池へ直接熱輻射を伝達させるようにしました。これにより、自由空間における黒体限界の制約を受けなくなるため、従来は光源内部に閉じこめられて利用出来なかった成分(②)をも発電に利用可能になり、太陽電池で生成される光電流密度の大幅な増大が可能となると期待されます。



上記のコンセプトに基づき、実際に作製したデバイスの模式図を図 2(a)に、作製した発電デバイスの顕微鏡写真を図 2(b)(c)に示します。本デバイスでは、シリコンを材料とした熱輻射光源[図 2(b)]と、シリコンを材料とした透明(高屈折率)基板が、微小な空隙(140 nm 未満)を隔てて一体化されており、図 1(b)で示した原理により、光源内部で発生した熱輻射を、黒体限界を超えて透明基板側に直接引き出すことが可能となります。さらに、透明(高屈折率)基板の裏側には太陽電池(InGaAs 材料を用いたもの)[図 2(c)]が一体化されているため、透明基板側に引き出された熱輻射は、太陽電池まで、そのまま伝搬し、従来の限界を超える電流密度を生成することが出来ます。なお、同図(a)に示すように、光源を細長い梁で支持することで、光源から梁を通して逃げる熱を極力減らし、光源部のみを 1000 K 以上の高温に加熱出来るように工夫しています。



作製した微小空隙を有する発電デバイスと、参照用に作製した熱輻射光源と太陽電池が十分な距離離れた従来の原理に基づく発電デバイスについて、光源をほぼ同じ温度に加熱した際に得られた太陽電池の電流電圧特性の測定結果を図 3(a)(b)に示します。従来の原理のデバイス[図 3(a)]と比較して、今回作製した発電デバイス[図 3(b)]においては、同じ温度において、5~10 倍の光電流密度が得られることが確認出来ました。さらに、光源の加熱温度を変化させながら、両デバイスで得られた電流密度の最大値をプロットした結果を図 3(c)に示します。同図の黒線は、従来の手法によって得られる光電流密度の理論限界(黒体限界)を示していますが、新デバイスにおいては、光源温度が 1100 K 以上の場合に、黒体限界を超える光電流密度(黒体限界の 1.5 倍)が得られていることが確認出来ます。以上より、熱輻射光源と太陽電池を、透明(高屈折率)基板を介して、微小距離まで近接させるというコンセプトに基づいた一体型デバイスの作製により、従来原理のデバイスに比べ、大幅な電流密度増大に加え、黒体限界をも超える光電流密度の実現に成功したと言えます。

なお、今回は、黒体限界を打破する光電流密度を得ることを中心に研究を進めましたが、数値計算結果によれば、デバイス構造や光源の動作温度が最適化された場合に、現状の単一材料からなる太陽光発電の発電効率(20~25%程度)を凌駕する、35%以上のエネルギー変換効率の実現可能であることが明らかとなっています。今回作製したデバイスでは、デバイス構造や光源の動作温度が最適化されていないため(例えば、太陽電池の直列抵抗が高いこと、光源と透明(高屈折率)基板の間の空隙が理想的な場合(100 nm 以下)よりも大きいこと、動作温度が理想的な温度(1300-1400K)に比べて低いこと等のため)、実験的に得られた開放電圧、短絡電流、曲線因子が理想値よりも低く、結果的に、エネルギー変換効率(投入した熱エネルギーと得られた電力の比)が、理論値に達していませんが、今後は、発電効率の向上に向けて、さらなる改良を進めていく予定です。

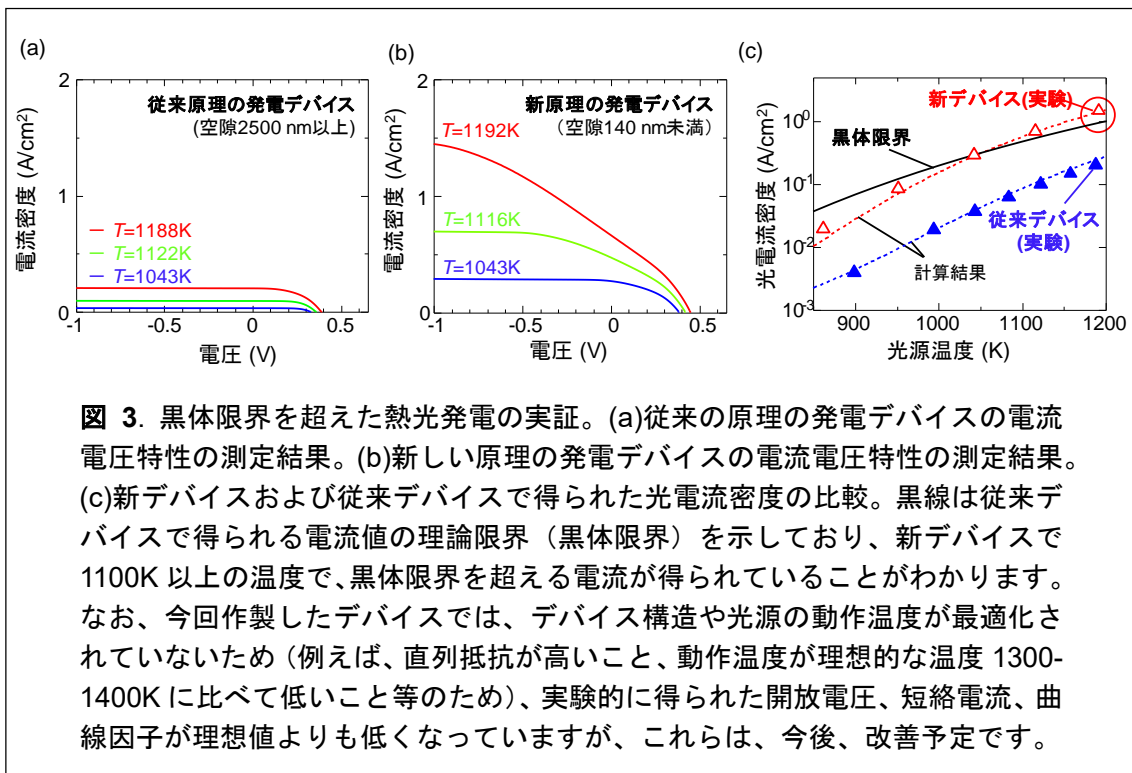


図 3. 黒体限界を超えた熱光発電の実証。 (a)従来原理の発電デバイスの電流電圧特性の測定結果。(b)新しい原理の発電デバイスの電流電圧特性の測定結果。(c)新デバイスおよび従来デバイスで得られた光電流密度の比較。黒線は従来デバイスで得られる電流値の理論限界（黒体限界）を示しており、新デバイスで1100K以上の温度で、黒体限界を超える電流が得られていることがわかります。なお、今回作製したデバイスでは、デバイス構造や光源の動作温度が最適化されていないため（例えば、直列抵抗が高いこと、動作温度が理想的な温度1300-1400Kに比べて低いこと等のため）、実験的に得られた開放電圧、短絡電流、曲線因子が理想値よりも低くなっていますが、これらは、今後、改善予定です。

3. まとめと波及効果

今回、高温 (>1100 K) の熱輻射体と、室温に保った太陽電池（透明(高屈折率)基板付き）を、接触させることなく光の波長よりも十分小さな距離 (<140 nm) まで近づけることで、高温物体の内部で発生した高密度な熱輻射を、自由空間に取り出すことなく、直接太陽電池の内部に取り込むことが可能な一体型熱光発電デバイスを開発し、従来原理の熱光発電システムに比べ、5-10 倍の光電流密度を実現するとともに、黒体限界をも超える光電流密度を得ることに成功しました。これは、光源に与えられる加熱パワーのうち、他の要因（熱伝導損失等）で失われるものの割合を相対的に減少させられることをも意味しており、今後、デバイス構造等の最適化（直列抵抗低減等）や動作温度の増大を図ることで、小型・高効率熱光発電システムとしての展開が期待されます。例えば、光源の加熱に、集光太陽光の熱エネルギーを利用すれば、現在の太陽光発電の発電効率を凌駕する、超小型かつ高効率 (>35%) な次世代太陽光発電の実現が期待されます。また、光源の加熱には、廃熱等の様々な形態の熱エネルギーを活用することが出来るため、携帯可能な小型災害用非常電源としての利用も期待されます。以上のように、本成果は、太陽光や各種熱エネルギーの有効利用を通して、脱炭素社会の実現に貢献することが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学研究費基盤研究S：研究開発課題「近接場熱輻射の帯域制御手法の確立と熱光発電への展開」（研究代表者 野田 進、課題番号 17H06125）のもとに推進されました。

<用語解説>

- 注 1) 熱輻射**：有限の温度の物質において、内部の電子が熱運動することによって生じる発光のことです。物質の温度が高くなるほど、熱運動が激しくなるため、発光強度が強まるとともに、よりエネルギーの高い（波長の短い）光が生じるようになります。特に、物質の温度が約 1000 K 以上になると、可視光や近赤外線の熱輻射が生じるため、太陽電池に照射した際に電流が生成されます。
- 注 2) 黒体限界**：ある温度の物質から外部の自由空間に取り出すことが出来る熱輻射パワーの理論限界のことです。従来の発電システムでは、高温物体の熱輻射を、自由空間を伝搬させてから太陽電池に照射しているため、必ず黒体限界よりも小さなパワーしか発電に利用することが出来ませんでした。
- 注 3) 熱光発電**：熱エネルギーを利用して物体を加熱し、そこで生じた熱輻射を太陽電池に照射することで電力に変換する発電方式です。物体を加熱するための熱エネルギーとして、太陽熱、燃焼熱など様々な熱エネルギーを利用することが可能です。また、通常の太陽光発電と比較して、小さな面積でより大きな電力を生成可能であるという特長を有します。
- 注 4) 課題の補足**：熱輻射光源から十分な密度の熱輻射パワーが自由空間に取り出せないことにより、光源に与えられる加熱パワーのうち別の要因（熱伝導損失等）で失われるものの割合が相対的に増え、結果的に太陽電池で発生する電力がさらに減少するという課題も存在します。
- 注 5) プレス発表「物体からの熱輻射スペクトルの大幅な狭帯域化に成功 —高効率太陽電池応用など、エネルギーの有効利用に向けた重要な一歩を達成—」を参照のこと。**
https://www.kyoto-u.ac.jp/static/ja/news_data/h/h1/news6/2012/120709_1.htm
- 注 6) プレス発表「物体からの熱輻射を超高速に制御することに世界で初めて成功 —望む波長の光のみを放射し、高速で ON/OFF できる理想的な熱輻射光源の実現—」を参照のこと。**
<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2014-07-28>
- 注 7) プレス発表「「熱エネルギー」を太陽電池が効率よく発電できる波長の「光」に変換することに初めて成功」を参照のこと。**
<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2016-12-27>
- 注 8) M. Suemitsu, T. Asano, T. Inoue, and S. Noda, "High-efficiency thermophotovoltaic system that employs an emitter based on a silicon rod-type photonic crystal," ACS**

Photonics, vol.7, pp. 80-87 (2019).

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsp Photonics.9b00984>

<研究者のコメント>

これまで、高温物体の熱輻射の自在な制御と、その発電システムへの応用を見据えて、着実に研究開発を進めてきましたが、今回、熱輻射が抱える根本的な課題である「黒体限界」を克服した一体型デバイスを実現できたことは、学術面および将来の産業応用の観点から、極めて重要な成果であると言えます。現状のデバイスは、エネルギー変換効率の面では、まだ多くの改善が必要ですが、今後は、デバイス構造の一層の深化を進めることで、数値計算結果で予測される、高効率なエネルギー変換の実現を目指していきたいと考えています。

<論文情報>

タイトル：“Integrated near-field thermophotovoltaic device overcoming blackbody limit”

著者：T. Inoue*, K. Ikeda, B. Song, T. Suzuki, K. Ishino, T. Asano, and S. Noda*

(*: Corresponding authors: T. Inoue and S. Noda)

所属：Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University, Kyoto 615-8510,
Japan

掲載誌：ACS Photonics

DOI：. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.1c00698>