

令和 3 年 4 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22105

研究課題名（和文）ヘビードープ半導体ナノ粒子を用いた赤外光変換透明デバイスの開発

研究課題名（英文）Development of clear and transparent infrared light to energy conversion device

研究代表者

坂本 雅典（sakamoto, masanori）

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号：60419463

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：赤外域に局在表面プラズモン共鳴（LSPR）を示すヘビードープ半導体ナノ粒子を光捕集材として利用する事により、既存のチャンピオンデータを大きく上回る効率で赤外光を化学エネルギーに変換することに成功した。さらには実現不可能と考えられていた長波長限界（2000～2500 nm）領域の太陽光のエネルギー変換を世界で初めて実現した。更には、赤外光が目に見えないという特性を利用して、赤外光を選択的に吸収する赤外捕集材を活性層として用いる事で窓ガラスと全く見分けのつかない無色透明の太陽電池の開発が可能であることを世界で初めて実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地表に到達する太陽光の46%は赤外域の太陽光（熱線）であり、未利用の太陽光エネルギー資源として大きな可能性が秘められている。一方で、現代社会においては、熱線はヒートアイランド現象などの環境問題を引き起こす厄介なエネルギーという印象が強い。熱線（赤外光）をエネルギー資源に変える科学技術が開発されれば、熱線制御（熱線遮蔽）、未利用再生可能エネルギーの開発という二つの面で、太陽光利用に関連する学術研究、産業に大きなインパクトを与え、破壊的イノベーションを創出することができる。

研究成果の概要（英文）：By using heavy-doped semiconductor nanoparticles that exhibiting localized surface plasmon resonance (LSPR) in the infrared region as a light-harvesting material, we succeeded to convert infrared light into chemical energy with an efficiency that exceeds the existing champion record. Furthermore, we realized that the energy conversion of solar light in the long-wavelength limit (2000-2500 nm) region for the first time. By utilizing the property that infrared-light-selective light-harvesting materials are invisible, we demonstrated the proof of concept of colorless and transparent solar cells, which are indistinguishable from window glass.

研究分野：物理化学

キーワード：ナノ粒子 太陽電池 光化学 赤外光 局在表面プラズモン共鳴

1. 研究開始当初の背景

全太陽エネルギーのおよそ半分を占める赤外域の太陽光は、人類に残された最大級の未使用エネルギー資源である。赤外域の太陽光を電力や化学エネルギーに変換する技術は、現代社会の直面する環境、エネルギー問題の解決に大きく寄与することは間違いない。また、赤外光のエネルギー利用法の開発は、今までにない太陽エネルギー使用の形を産業界、人間社会に提案することができる。一方で、赤外光エネルギーに変換の技術は確立されていなかった。本申請課題では可視を透過し、赤外光を吸収する局在化表面プラズモン共鳴 (LSPR) 材料を用いて**赤外光をエネルギーに変換する透明な太陽電池を開発**することで、赤外光のエネルギー資源化を目指す。

2. 研究の目的

本申請課題では可視を透過し、赤外光を吸収する LSPR 材料を用いて**赤外光をエネルギーに変換する透明な太陽電池を開発**する。赤外域の太陽光エネルギーの有効利用技術が確立されれば、現代社会の直面する環境、エネルギー問題の解決に大きく貢献することは間違いない。また、赤外光のエネルギー利用法の開発を通じて、今までにない太陽エネルギー使用の形を産業界、人間社会に提案することができる。申請者の提案する赤外光-エネルギー変換の特徴を以下に示す。

既存の太陽光エネルギー変換プロセスと干渉しない: 赤外光の利用は光合成とも既存の太陽電池とも競合しないため、既存のシステムと共存したエネルギー変換を実現できる。例えば、現行のシリコン太陽電池の上部に本提案の透明太陽電池を設置してもシリコン太陽電池が吸収する光の量は低下しないため、面積当たりのエネルギー変換効率を簡便に向上させることができる。また、ビニールハウスの天井として透明太陽電池を設置しても植物の成長を妨げないため、農業を行いながらのエネルギー生産も可能である。

透明化、ユビキタス化が可能: 赤外光の大きな特徴として、人の目に見えないことが挙げられる。このため、赤外光を選択的に吸収する材料は透明化が可能である。この性質を用いると、住宅やビルの窓ガラスなど、都市部のいたるところに透明太陽電池を設置し、エネルギー生産をおこなうことができる。

自然や人工の太陽光エネルギー利用と太陽を奪い合わないエネルギー生産プロセスの実現、透明性を生かしたユビキタスエネルギー生産は社会、産業、環境に大きなインパクトを与えるイノベーションを創出する。わずかに変換効率1%のシステムであっても、関連技術により削減可能な CO₂ 量は国内で年間 2220 万トンと試算されており、環境問題の解決に大きく貢献することができる。それだけではなく、本研究で取り組む赤外光変換は、光化学、電気化学、材料科学、有機化学などの幅広い学問領域に新しい視点をもたらし、学術の体系や方向を大きく変革・転換させることが期待できる。

3. 研究の方法

申請者はヘビードープ半導体ナノ粒子である硫化銅ナノ粒子の LSPR の励起に誘起される新しいキャリア移動機構(**PITCT: Plasmon induced “transit” carrier transfer**)を発見した。PITCT は、遅い緩和チャンネルを人為的に導入することで、従来では速度論的にほとんど進行しなかった熱キャリア移動の劇的な効率化を実現することができる [*Nat. Commun.*, **9**, 2314, (2018).] (図1 左図)。この PITCT を応用して LSPR ナノ粒子を赤外光吸収材として有する光触媒を開発することで、現在までに報告されている材料を上回る効率で赤外域の光を化学エネルギーに変換することを目指す。LSPR を用いた光エネルギー変換は、効率の低さがエネルギー変換へ応用する際の障害となっていたが、PITCT の発見はこの常識を打ち破る革新的なものであり、赤外光のエネルギー利用へのブレイクスルーとなることが期待される。

本申請研究では、これらの成果を発展させることで今までにない高効率、高耐久性の赤外応答透明太陽電池の開発を行う。このため、PITCT 機構を導入することで効率的な光-エネルギー変換を実現する材料の開発を行う。太陽電池の光電変換特性を左右する電子注入効率と電荷再結合寿命の評価は時間分解過渡吸収測定により行い、ヘテロ界面における電子注入の学理解明を行う。

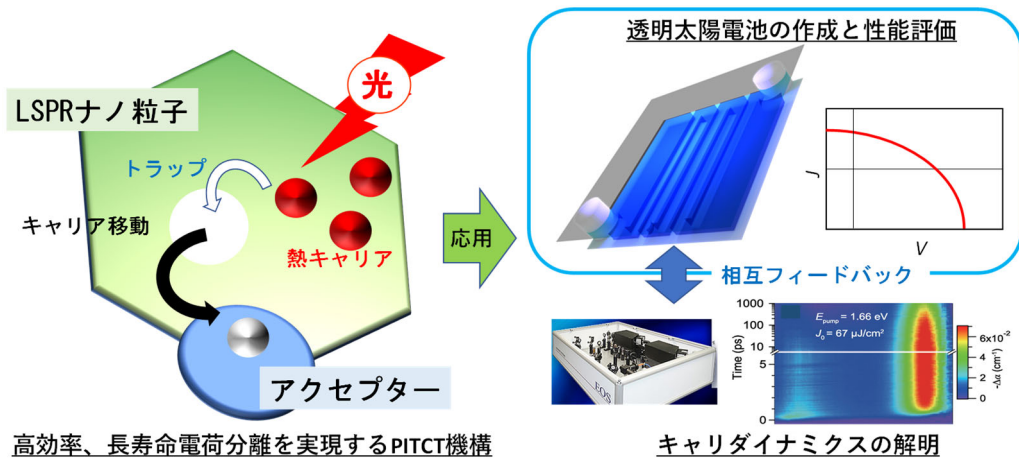


図 1. PITCT 機構の模式図 (左図) とそれを応用した透明太陽電池の開発

4. 研究成果

熱線 (赤外光) を捕集し、電気もしくは化学エネルギーに変換することは 12 億年以上の光利用の歴史をもつ植物でさえ成し遂げていない難題であり、学術的な観点からも困難を極める。エネルギーの低い赤外光を再生可能エネルギーとして活用するには、可視光とは異なる方法論の確立が必要である。本申請研究においては、申請者は赤外光エネルギー変換の実現を目指して実験を推進し、以下の成果を得た。

世界最高効率の赤外光応答光触媒の開発: 赤外域に局在表面プラズモン共鳴 (LSPR) を示すヘビードープ半導体ナノ粒子を光捕集材として利用する事により、既存のチャンピオンデータを大きく上回る効率で赤外光を化学エネルギーに変換することに成功した[波長 1100 nm において変換効率 4%を実現、*J. Am. Chem. Soc.* 2019, 141, 2446-2450.]。さらには実現不可能と考えられていた長波長限界 (2000~2500 nm) 領域の太陽光のエネルギー変換を世界で初めて実現した (図 2)。

赤外光をエネルギーに変換する透明な太陽電池の概念実証: 赤外光が目に見えないという特性を利用して、赤外光を選択的に吸収する赤外捕集材を活性層として用いる事で窓ガラスと全く見分けのつかない無色透明の太陽電池の開発が可能であることを世界で初めて実証した[*Nat. Commun.* 2019,10, 406.特許出願済] (図 3)。

これらの成果は、国際的学術誌で発表されると同時に、日経新聞、朝日新聞などの新聞各社、TBS などのテレビ局、リケラボ、EMIRA などの web マガジンなど多種多様なメディアによって取り上げられた。

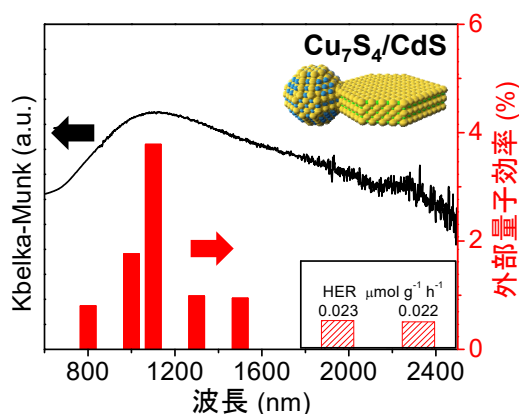


図 2. 開発した赤外応答光触媒の水素生成活性

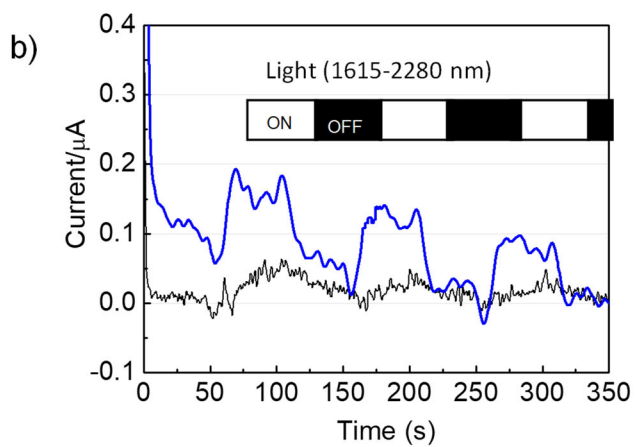


図3. a)透明な電子素子の写真、b) a)の活性層、電子輸送層を利用して作成した光電極の光電気化学測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8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 1.S. Kim, H. Mizuno, M. Saruyama, M. Sakamoto, M. Haruta, H. Kurata, T. Yamada, K. Domen, and T. Teranishi	4. 巻 11
2. 論文標題 Phase Segregated Cu ₂ -xS-Ni ₃ Se ₄ Bimetallic Selenide Nanocrystals Formed through Cation Exchange Reaction for Active Water Oxidation Precatalyst	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chem. Sci.	6. 最初と最後の頁 1523 ~ 1530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9SC04371C	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 -
1. 著者名 Sakamoto Masanori, Hyeon-Deuk Kim, Eguchi Daichi, Chang I.-Y., Tanaka Daisuke, Tahara Hirokazu, Furube Akihiro, Minagawa Yoshihiro, Majima Yutaka, Kanemitsu Yoshihiko, Teranishi Toshiharu	4. 巻 123
2. 論文標題 Impact of Orbital Hybridization at Molecule?Metal Interface on Carrier Dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 25877 ~ 25882
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b04231	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 -
1. 著者名 Lian Zichao, Sakamoto Masanori, Kobayashi Yoichi, Tamai Naoto, Ma Jun, Sakurai Tsuneaki, Seki Shu, Nakagawa Tatsuo, Lai Ming-Wei, Haruta Mitsutaka, Kurata Hiroki, Teranishi Toshiharu	4. 巻 13
2. 論文標題 Anomalous Photoinduced Hole Transport in Type I Core/Mesoporous-Shell Nanocrystals for Efficient Photocatalytic H ₂ Evolution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 8356 ~ 8363
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.9b03826	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 -
1. 著者名 Kawawaki Tokuhisa, Nakagawa Tatsuo, Sakamoto Masanori, Teranishi Toshiharu	4. 巻 141
2. 論文標題 Carrier-Selective Blocking Layer Synergistically Improves the Plasmonic Enhancement Effect	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 8402 ~ 8406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b01419	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 -

1. 著者名 Lian Zichao, Sakamoto Masanori, Vequizo Junie J. M., Ranasinghe C. S. Kumara, Yamakata Akira, Nagai Takuro, Kimoto Koji, Kobayashi Yoichi, Tamai Naoto, Teranishi Toshiharu	4. 巻 141
2. 論文標題 Plasmonic p n Junction for Infrared Light to Chemical Energy Conversion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 2446 ~ 2450
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.8b11544	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 -

1. 著者名 Sakamoto Masanori, Kawawaki Tokuhisa, Kimura Masato, Yoshinaga Taizo, Vequizo Junie Jhon M., Matsunaga Hironori, Ranasinghe Chandana Sampath Kumara, Yamakata Akira, Matsuzaki Hiroyuki, Furube Akihiro, Teranishi Toshiharu	4. 巻 10
2. 論文標題 Clear and transparent nanocrystals for infrared-responsive carrier transfer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-08226-2	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 -

1. 著者名 Zhang Jie, Kouno Hironori, Yanai Nobuhiro, Eguchi Daichi, Nakagawa Tatsuo, Kimizuka Nobuo, Teranishi Toshiharu, Sakamoto Masanori	4. 巻 7
2. 論文標題 Number of Surface-Attached Acceptors on a Quantum Dot Impacts Energy Transfer and Photon Upconversion Efficiencies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 1876 ~ 1884
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.0c00771	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 -

1. 著者名 Wang Li, Takeda Shohei, Sato Ryota, Sakamoto Masanori, Teranishi Toshiharu, Tamai Naoto	4. 巻 6
2. 論文標題 Morphology-Dependent Coherent Acoustic Phonon Vibrations and Phonon Beat of Au Nanopolyhedrons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 5485 ~ 5489
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.0c05806	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5件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 M. Sakamoto
2. 発表標題 IR-light to Energy Conversion
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Recent Progress of Energy and Environmental Photocatalysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本 雅典
2. 発表標題 世界最高効率で赤外光から水素を生成する光触媒の研究と、エネルギー社会への展開
3. 学会等名 川崎ナノテクノロジーセミナー-革新的ナノテクノロジー技術によるエネルギー社会の変革 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sakamoto
2. 発表標題 Plasmonic p-n junction for infrared light to chemical energy conversion
3. 学会等名 神戸大 開拓プロジェクト 国際会議 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本 雅典
2. 発表標題 赤外光のエネルギー変換、信号変換が可能な無色透明材料の開発とデバイスへの応用
3. 学会等名 第20回光通信技術展 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Sakamoto
2. 発表標題 Plasmonic p-n junction for infrared light to chemical energy conversion
3. 学会等名 The 2nd CSLT-CSJ Joint Symposium 2021 - Catalyst for Energy Conversion and Storage - (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Masanori Sakamoto	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 593
3. 書名 Photosynthetic Responses in Molecules and Molecular Aggregates	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 導電膜、分散体とこれらの製造方法、及び導電膜を含むデバイス	発明者 坂本雅典	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2020/038907	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 赤外線センシングデバイス及びそれに用いる抵抗可変膜	発明者 坂本雅典	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2021/015365	出願年 2021年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------

スペイン	Universidad de Castilla la Mancha			
イタリア	ミラノ工科大			