

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：17601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K15221

研究課題名（和文）IoT用独立型電源のための環境調和型多元系熱電材料の無次元性能指数向上

研究課題名（英文）Improvement of dimensionless figure of merit of environmentally-friendly thermoelectric materials for IoT applications

研究代表者

永岡 章 (Nagaoka, Akira)

宮崎大学・工学部・准教授

研究者番号：70784271

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高性能な熱電材料の指標となる無次元性能指数 $ZT > 1$ を達成している環境調和型p型 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS)の更なる高性能化に向けた機能性粒界の探索を実施した。CZTS中の3粒界は電気的に中性であり、電気伝導の妨げにならないということを明らかにした。CZTSのデバイス応用のためには、伝導型制御が必要となる。Agを混晶した $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_2\text{ZnSnS}_4$ (CAZTS)はn型伝導を示した。p型CZTS単結晶を用いたsingle-leg熱電デバイスを作製し、温度差473 Kにおいて最大変換効率 = 4%を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超スマート社会の実現に向けて、様々な環境下において各種IoTセンサー駆動のための環境調和型独立電源の技術が求められおり、環境中の「温度差」を活用する熱電発電は適している。しかし、これまでの熱電材料は、希少元素や毒性元素が含まれており、環境中の温度差を利用した自立電源として大規模な普及を目指すためには、低コストかつ環境調和した熱電発電デバイス開発が望まれる。本研究では、環境調和型 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS)の更なる熱電特性向上に特化した機能性粒界を探索し、材料設計指針を示した。CZTSベースの熱電デバイスの作製に成功し、数百時間動作後でも発電特性はほぼ変化しないことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We investigated the functional grain-boundaries for high performance thermoelectric $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) exceeding dimensionless figure of merit ZT value of 1.0. 3 grain-boundaries were charge neutral in CZTS, which is effective for improvement of thermoelectric properties. Conversion of p-n conduction is required for the realization of a CZTS-based thermoelectric device. n-type $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_2\text{ZnSnS}_4$ (CAZTS) can be obtained by controlling Ag-alloying. We report the p-type CZTS-based single-leg thermoelectric device with conversion efficiency of 4% at a temperature difference of 473 K.

研究分野：材料工学

キーワード：熱電材料 熱電発電デバイス 機能性材料 単結晶 粒界

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、データを活用する超スマート社会の実現に向けて IoT 機器の爆発的な増加が予想されており、これらの機器に電力を供給する小型独立電源の開発が求められている。身の回りの数十度から製鉄所における数百度といった様々な環境下に存在する熱による温度差を利用する熱電発電は、独立発電技術として期待されている。しかし、これまでの熱電材料は、希少元素や毒性元素が含まれており、環境中の温度差を利用した自立電源として大規模な普及を目指すためには、低コストかつ環境調和した熱電発電デバイス開発が望まれる。デバイス開発の一つの指標として、無次元性能指数 $ZT > 1$ が挙げられるが、電気的特性と熱電特性はトレードオフの関係であるため最適化が困難であり、条件を満たす熱電材料は限られている。

2. 研究の目的

主な熱電材料と新規環境調和型熱電材料の ZT 推移を表す。有毒な鉛やレアメタルであるテルルを含んでいる $PbTe$ や Bi_2Te_3 の主要な熱電材料は 1950 年代から開発が始まり、現在高い $ZT > 2$ を達成している系も報告されている。これらの熱電材料は、室温 ~ 500°C で動作し、変換効率は 10% 程度である。近年、環境調和した Cu_2S 系や SnS 系材料の開発も活発に行われているが、まだまだ発展途中である。さらに大部分のレコード ZT はアメリカと中国の研究グループから報告されている。本研究グループでは、環境調和した元素から構成される p 型 Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) 単結晶が 500 °C の環境下で $ZT=1.6$ を達成している。

一般的な熱電材料は、多結晶サンプルを作製し、結晶中のランダム粒界やナノヘテロ構造を用いた高密度界面を導入する事でフォノン散乱を促進し、熱伝導度改善に繋がっている。しかしながら、高密度界面は同時にキャリアの障壁となり流れを妨げ、電気的特性を下げると一面を持つ。本研究ではこれまで開発した「 $ZT > 1$ を示す多元系熱電 CZTS 単結晶材料の更なる熱電特性向上とデバイス応用」を目的とする。CZTS 単結晶材料の高い電気的特性且つ低い熱伝導率の最適化のために、電荷的に中性な粒界や異相界面の様なエネルギー的に安定な機能性界面を調査する。粒径がミリオオーダー以下の従来の多結晶焼結体では界面の評価は難しく、単結晶中に界面を形成する事で大きなスケールでの評価によって、最適な材料の組合せと詳細な知見を明らかにする。

ゼーベック効果を用いた基本的な熱電素子は、p 型と n 型の熱電材料の両端を金属電極とオーミック接触することで熱が導線を伝わり負荷部が破損することを防ぐパイ型素子が一般的である。材料毎にそれぞれ異なった ZT の温度依存性、熱膨張率、融点といった特性を有する。そのため、熱電特性や安定温度が大きく異なった p 型材料と n 型材料を用いた熱電デバイスは、変換効率の低下や長期安定性が期待できない。したがって、伝導型が制御できる材料はデバイス化に向けて大きなアドバンテージを有する。CZTS において Cu 空孔 (V_{Cu}) と Zn サイト Cu (Cu_{Zn}) アクセプター欠陥は、ドナー欠陥の形成エネルギーよりも低く、支配的であるため p 型伝導を示す。そのため、組成制御およびドーピング技術を用いた伝導型制御は難しく、信頼性のある n 型 CZTS は報告されていない [1]。CZTS の Cu 元素と同じ I 族元素である Ag 元素で置換された Ag_2ZnSnS_4 (AZTS) では、第一計算原理より Ag サイト Zn (Zn_{Ag}) 欠陥が浅いドナー欠陥となることで n 型半導体を示すとされている [2]。本研究では、CZTS の n 型伝導制御のために、Ag 混晶の最適化を実施する。得られた結果をフィードバックする事で、特に製鉄所などの高温環境下における IoT センサーへの電源となる環境調和した熱電デバイスの作製へ繋げる。

3. 研究の方法

(1) 機能性粒界の探索

本研究では、 $ZT > 1$ を示す環境調和型 CZTS 中の特定粒界を対象として調査を行った。構成元素である Sn を溶媒とした溶液成長から冷却速度を制御する事で、CZTS 多結晶サンプルを作製した。電子顕微鏡(SEM)を用いて組織の観察後、電子後方散乱回折法(EBSD)を用いて粒界の Σ 値を決定した。様々な粒界バリアは、ケルビンプローブフォース顕微鏡によって調査した。これらの結果から熱電特性向上のための機能性粒界を探索した。

(2) CZTS の Ag 混晶による pn 伝導制御

p 型 CZTS に Ag を混晶した $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_2\text{ZnSnS}_4$ (CAZTS)において、n 型伝導のために最適な Ag 組成を調査した。構成元素である Sn を溶媒とした溶液成長から CAZTS 単結晶サンプルを作製し、X 線回折(XRD)を用いた結晶構造解析や熱電特性を測定した。

(3) CZTS 熱電デバイスの開発

IoT 用独立電源に向けた応用研究として、p-型 CZTS 単結晶を用いた single-leg デバイスの作製を行った。コンタクト層として Au 薄膜、接合電極として Ag ペースト、そして接続電極として Cu プレートを用いたデバイス構造となっている。低温部を 300 K (室温)に保ちながら、高温部を変化させることで発電特性を評価した。

4. 研究成果

(1) 機能性粒界の探索

CZTS 中にミリオオーダーのマルチグレインを作製し、評価を行った。 $\Sigma 3$ 粒界は電氣的に中性であり電気伝導の妨げにならないということを明らかにした。一方で $\Sigma 5$ 粒界は電氣的に負に帯電しており、キャリアにとってバリアになることを明らかにした。これらの結果から、CZTS 中の $\Sigma 3$ 粒界は、高効率な熱電材料に必要な高い電気伝導と低い熱伝導率を実現するための機能性粒界であると決定した。

(2) CZTS の Ag 混晶による pn 伝導制御

XRD 測定から CAZTS 単結晶は、正方晶ケステライト構造を示し、ZnS といった異相を含んでいなかった。図 1 に示すように Ag を混晶した単相 CAZTS 単結晶成長に成功し、 $x > 0.4$ の Ag 組成で n 型伝導になることを明らかにした。しかしながら p 型 CZTS と比較して電気伝導率が 100 分の 1 程度といった低い熱電特性という課題がある。今後は、成長条件や組成制御によって熱電特性を改善させる必要がある。



図 1 CAZTS 単結晶インゴット

(3) CZTS 熱電デバイスの開発

図 2 に p 型 CZTS 単結晶を用いた single-leg 熱電デバイス構造を示す。温度差 473 K において最大出力 96 mW、最大変換効率 $\eta = 4\%$ を達成した。硫化物のような環境調和型材料においてデバイス化の報告はほとんどない。これは、単純に高い ZT を有する材料が少ない事に加えて、高温で動作させることで構成元素である S が気化し、材料として長期安定性を保持することが難しいためである。CZTS と同様の p 型デバイスとして、SnS [3]、 $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ [4] や $\text{Cu}_{26}\text{Nb}_2\text{Ge}_6\text{S}_{32}$ [5]

の報告があるが、やはり変換効率は数百度の温度差において3~6%である。CZTS single-leg デバイスは、300 °C 以上の高温における動作は安定しており、現状 500 時間動作後でも発電特性はほぼ変化しないことを明らかにした。CZTS 内の温度分布は図 3 に示すように、COMSOL による実験値を用いた計算シミュレーションを行い、図 2 のデバイス構造において、発電に必要な温度勾配を確認した。

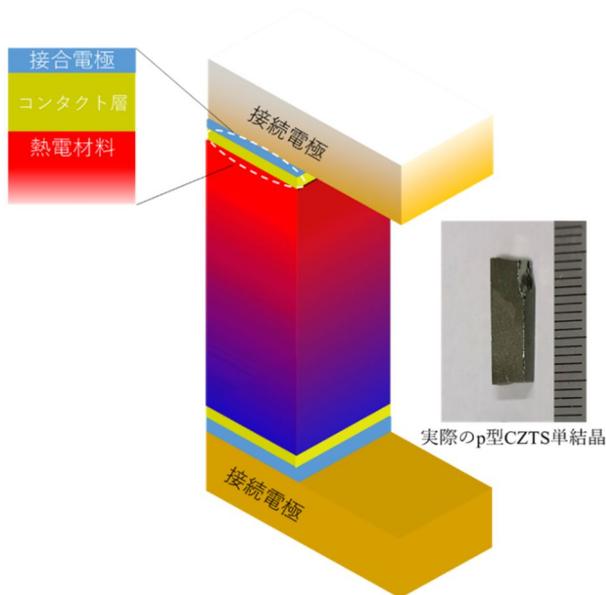
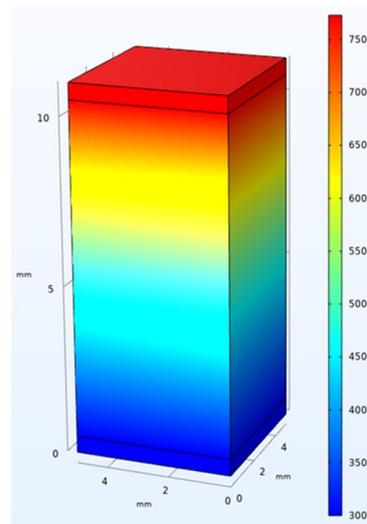


図 2 p 型 CZTS single-leg 熱電デバイス構造



シミュレーションによるCZTS内の温度分布 (温度差473 K)

図 3 CZTS 熱電デバイス内の温度分布

【引用文献】

- [1] S. Chen *et al.*, *Adv. Mater.* **25**, 1522-1539 (2013).
- [2] Z. K. Yuan *et al.*, *Adv. Funct. Mater.* **25**, 6733-6743 (2015).
- [4] W. He *et al.*, *Science* **365**, 1418-1424 (2019).
- [4] H. Hu *et al.*, *Adv. Mater.* **33**, 2103633 (pp. 1-10) (2021).
- [5] R. Chetty *et al.*, *J. Mater. Chem. C* **7**, 5184-5192 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Okamoto Kouichi, Nagaoka Akira, Nagatomo Katsuma, Yoshino Kenji, Ota Yasuyuki, Nishioka Kensuke	4. 巻 171
2. 論文標題 Controlling the conduction type in a thermoelectric material (Cu _{1-x} Ag _x) ₂ ZnSnS ₄	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics and Chemistry of Solids	6. 最初と最後の頁 111016 ~ 111016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpcs.2022.111016	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 Nagaoka Akira, Yoshino Kenji, Masuda Taizo, Sparks Taylor D., Scarpulla Michael A., Nishioka Kensuke	4. 巻 9
2. 論文標題 Environmentally friendly thermoelectric sulphide Cu ₂ ZnSnS ₄ single crystals achieving a 1.6 dimensionless figure of merit ZT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 15595 ~ 15604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1ta02978a	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 該当する
1. 著者名 Shigeeda Yusuke, Nagaoka Akira, Yoshino Kenji, Nishioka Kensuke	4. 巻 161
2. 論文標題 Growth and thermoelectric characterization of chalcopyrite ZnSnSb ₂ with pseudocubic structure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics and Chemistry of Solids	6. 最初と最後の頁 110417 ~ 110417
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpcs.2021.110417	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 Kamimizutaru Koki, Nagaoka Akira, Shigeeda Yusuke, Nishioka Kensuke, Higashi Tomohiro, Yasui Shintaro, Yoshino Kenji	4. 巻 163
2. 論文標題 Chimney-ladder sulfide Sr ₉ Ti ₈ S ₂₄ as a thermoelectric material with low thermal conductivity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics and Chemistry of Solids	6. 最初と最後の頁 110589 ~ 110589
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpcs.2022.110589	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 Nagaoka Akira, Takeuchi Manato, Shigeeda Yusuke, Kamimizutaru Koki, Yoshino Kenji, Nishioka Kensuke	4. 巻 61
2. 論文標題 Chalcostibite Single-Crystal CuSbS_2 as High-Performance Thermoelectric Material	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 2407 ~ 2411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.E-M2020850	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 Nagaoka Akira, Yoshino Kenji, Kakimoto Koichi, Nishioka Kensuke	4. 巻 555
2. 論文標題 Phase diagram of the $\text{Ag}_2\text{SnS}_3\text{?ZnS}$ pseudobinary system for $\text{Ag}_2\text{ZnSnS}_4$ crystal growth	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 125967 ~ 125967
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcrysgro.2020.125967	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 Nagaoka Akira, Nagatomo Katsuma, Nakashima Koki, Hirai Yuichi, Ota Yasuyuki, Yoshino Kenji, Nishioka Kensuke	4. 巻 64
2. 論文標題 Thermoelectric Conversion Efficiency of 4% in Environmental-Friendly Kesterite Single Crystal	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 2535 ~ 2541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-E2023002	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 長友 克馬、永岡 章、西岡 賢祐	4. 巻 2023
2. 論文標題 シミュレーションによる多元系熱電材料 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ の熱電変換効率の評価	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 多元系化合物・太陽電池研究会 年末講演会論文集	6. 最初と最後の頁 13 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.57386/tmc.2023.0_13	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 長友 克馬、永岡 章	4. 巻 50
2. 論文標題 溶液成長による多元系ケステライト熱電材料の単結晶成長	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本結晶成長学会誌	6. 最初と最後の頁 50-3-07 pp1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.19009/jjacg.50-3-07	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34件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 永岡 章, 長友 克馬, 岡本 晃一, 吉野 賢二, 西岡 賢祐
2. 発表標題 ケステライト化合物Cu ₂ ZnSnS ₄ を用いた環境調和型熱電デバイスの開発
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡本 晃一, 永岡 章, 長友 克馬, 吉野 賢二, 西岡 賢祐
2. 発表標題 デバイス化を目的としたCu ₂ ZnSnS ₄ の伝導型制御と伝導メカニズムの変化
3. 学会等名 2022年度多元系化合物・太陽電池研究会 年末講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島 康貴, 永岡 章, 岡本 晃一, 長友 克馬, 吉野 賢二, 西岡 賢祐
2. 発表標題 カルコパイライト化合物ZnSnAs ₂ の熱電特性
3. 学会等名 2022年度多元系化合物・太陽電池研究会 年末講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長友 克馬, 永岡 章, 岡本 晃一, 西岡 賢祐
2. 発表標題 ケステライト化合物Cu ₂ ZnSnS ₄ の結晶粒界による熱伝導率制御
3. 学会等名 2022年度多元系化合物・太陽電池研究会 年末講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kouichi Okamoto, Akira Nagaoka, Katsuma Nagatomo, Kenji Yoshino, Kensuke Nishioka
2. 発表標題 Investigation of electrical properties of (Cu _{1-x} Ag _x) ₂ ZnSnS ₄
3. 学会等名 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsuma Nagatomo, Akira Nagaoka, Kensuke Nishioka
2. 発表標題 Impact of grain-boundary on thermal conductivity in the quaternary compound Cu ₂ ZnSnS ₄ crystals
3. 学会等名 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本 晃一, 永岡 章, 重枝 佑輔, 吉野 賢二, 西岡 賢祐
2. 発表標題 熱電変換材料(Cu _{1-x} Ag _x) ₂ ZnSnS ₄ の伝導型制御および伝導機構変化
3. 学会等名 第13回半導体材料・デバイスフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長友 克馬, 永岡 章, 岡本 晃一, 西岡 賢祐
2. 発表標題 環境調和型熱電材料Cu ₂ ZnSnS ₄ の結晶粒界導入による熱伝導率の低下
3. 学会等名 第13回半導体材料・デバイスフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsuma Nagatomo, Akira Nagaoka, Kouichi Okamoto, Kenji Yoshino and Kensuke Nishioka
2. 発表標題 Impact of grain-boundary on thermal conductivity in environmentally friendly thermoelectric sulphide Cu ₂ ZnSnS ₄
3. 学会等名 2022 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kouichi Okamoto, Akira Nagaoka, Katsuma Nagatomo, Kenji Yoshino, and Kensuke Nishioka
2. 発表標題 Growth and electric properties of n-type thermoelectric material (Cu _{1-x} Ag _x) ₂ ZnSnS ₄
3. 学会等名 2022 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本 晃一, 永岡 章, 長友 克馬, 吉野 賢二, 西岡 賢祐
2. 発表標題 n型(Cu _{1-x} Ag _x) ₂ ZnSnS ₄ 多結晶の電気伝導機構
3. 学会等名 第19回日本熱電学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長友 克馬, 永岡 章, 岡本 晃一, 西岡 賢祐
2. 発表標題 環境調和型熱電材料 Cu ₂ ZnSnS ₄ における熱伝導率に 及ぼす結晶粒界の影響
3. 学会等名 第19回日本熱電学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kouichi Okamoto, Akira Nagaoka, Yusuke Shigeeda, Kenji Yoshino, Kenji Nishioka
2. 発表標題 Evaluation of Thermoelectric Properties of N-type (Cu _{1-x} Ag _x) ₂ ZnSnS ₄
3. 学会等名 18th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-18) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本 晃一, 永岡 章, 重枝 佑輔, 吉野 賢二, 西岡 賢祐
2. 発表標題 n型(Cu _{1-x} Ag _x) ₂ ZnSnS ₄ 結晶の熱電特性評価
3. 学会等名 第18回日本熱電学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永岡 章, 重枝 佑輔, 岡本 晃一, 吉野 賢二, 西岡 賢祐
2. 発表標題 無次元性能指数ZT=1.6を示す擬立方晶Cu ₂ ZnSnS ₄ 単結晶
3. 学会等名 第18回日本熱電学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kouichi Okamoto, Akira Nagaoka, Yusuke Shigeeda, Kenji Yoshino, Kensuke Nishioka
2. 発表標題 Growth of n-type thermoelectric material (Cu _{1-x} Ag _x) ₂ ZnSnS ₄
3. 学会等名 1st Japan-France Virtual Workshop on Thermoelectrics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本 晃一, 永岡 章, 重枝 佑輔, 吉野 賢二, 西岡 賢祐
2. 発表標題 熱電変換材料(Cu _{1-x} Ag _x) ₂ ZnSnS ₄ の伝導メカニズム
3. 学会等名 2021年度多元系化合物・太陽電池研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本 晃一, 永岡 章, 重枝 佑輔, 吉野 賢二, 西岡 賢祐
2. 発表標題 熱電変換材料(Cu _{1-x} Ag _x) ₂ ZnSnS ₄ の伝導型制御
3. 学会等名 第12回半導体材料・デバイスフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Nagaoka
2. 発表標題 Thermoelectric energy conversion
3. 学会等名 Indo-Japan Workshop Advancement in concentrated photovoltaic system and its thermal management (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永岡 章
2. 発表標題 多元系カルコゲナイド熱電材料の開発動向と展望
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akira Nagaoka, Katsuma Nagatomo, Koki Nakashima, Yuichi Hirai, Yasuyuki Ota, Kenji Yoshino, and Kensuke Nishioka
2. 発表標題 Thermoelectric power generation from Environmental Friendly Kesterite Single Crystal
3. 学会等名 39th International Conference on Thermoelectrics (ICT2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuma Nagatomo, Akira Nagaoka, and Kensuke Nishioka
2. 発表標題 The role of grain boundary scattering in reducing the thermal conductivity of environmental friendly Cu ₂ ZnSnS ₄ compound
3. 学会等名 39th International Conference on Thermoelectrics (ICT2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長友 克馬, 永岡 章, 西岡 賢祐
2. 発表標題 シミュレーションを用いた多元系熱電材料Cu ₂ ZnSnS ₄ の熱伝導率制御と変換効率改善
3. 学会等名 2023年度多元系化合物・太陽電池研究会 年末講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 永岡 章, 長友 克馬, 三浦 昌真, 安井 伸太郎, 吉野 賢二, 西岡 賢祐
2. 発表標題 ZT >1を示すn型ケステライト化合物(Cu1-xAgx)2ZnSnS4単結晶の開発
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 永岡 章	4. 発行年 2023年
2. 出版社 (株)シーエムシー出版	5. 総ページ数 6
3. 書名 月刊機能材料 (4月号)	

1. 著者名 永岡 章	4. 発行年 2021年
2. 出版社 (株)技術情報協会	5. 総ページ数 5
3. 書名 月刊車載テクノロジー (12月号)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>宮崎大学工学部 環境・エネルギー工学研究センターホームページ https://www.miyazaki-u.ac.jp/env/ 宮崎大学研究者データベース https://srhumbd.miyazaki-u.ac.jp/html/100002083_ja.html</p>
--

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
---------	---------