

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02440

研究課題名（和文）コロイド法による海島構造制御を通じた高性能硫化物系ナノコンポジット熱電材料の創製

研究課題名（英文）Creation of High-Performance Sulfide-Based Nanocomposite Thermoelectric Materials by Controlling Sea-Island Structure Using Colloidal Method

研究代表者

前之園 信也（Maenosono, Shinya）

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：00323535

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,100,000円

研究成果の概要（和文）：種々のp型およびn型の熱電ナノ粒子を合成し、これらを組み合わせ、様々なp型およびn型ナノコンポジット熱電材料を創製した。不純物元素をドーピングすることで原子スケールの欠陥を導入したり、ナノ粒子を焼結することでナノスケールの結晶粒界を導入したり、あるいは異種のナノ粒子を配合して焼結することでメソスケールの海島構造を導入することができる。このように、階層的欠陥構造をコロイド化学的に導入することで、出力因子を最大化させる一方、熱伝導率を大幅に低減することにより、熱電変換性能を向上させることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球上で発生されたエネルギーのうち約7割のエネルギーが200℃以下の低温廃熱として捨てられている現状がある。本研究の成果を基にして、環境調和型硫化物系熱電材料の熱電変換効率を実用化レベルにまで向上できれば、環境調和型硫化物系熱電材料を用いた熱電素子を開発することにより、これらの低温廃熱のエネルギーハーベスティングが実現でき、地球温暖化抑制や省エネ対策に大きく貢献する。

研究成果の概要（英文）：In the p-type, $\text{Cu}_3\text{ZnSnS}_5$ -y, $\text{Cu}_3\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{SnS}_5$, Ag-doped SnS and SnSe nanoparticles were synthesised. Various nanocomposite thermoelectric materials were also created by blending $\text{Cu}_3\text{AlSnS}_5$ nanoparticles with Cu_2SnS_3 nanoparticles as nano-inclusions or blending $\text{Cu}_3\text{ZnSnS}_5$ -y nanoparticles with other p-type thermoelectric nanoparticles such as Cu_2SnS_3 as nano-inclusions. In the case of n-type, nanoparticles of CuFe_2S_3 , CoSbS, Ag-doped CuFeS_2 , $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{FeS}_2$, $\text{CuFe}_2\text{S}_{1.5}\text{Se}_{0.5}$ and SnSe_2 were synthesised and various nanocomposite thermoelectric materials comprising these combinations were created.

研究分野：ナノ材料化学

キーワード：ナノ粒子 熱電材料 ナノ構造化 ナノコンポジット フォノン散乱 格子熱伝導率 キャリア密度

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地球上で発生されたエネルギーのうち約 7 割のエネルギーが 200 °C 以下の低温廃熱として捨てられている現状がある。熱電素子によりこれらの低温廃熱のエネルギーハーベスティングが実現できれば、地球温暖化抑制や省エネ対策に大きく貢献する。しかし、代表的な熱電変換材料である Bi_2Te_3 をはじめ、現在研究されている多くの材料系では、Pb、Te、Se といった毒性の高い元素や希少な元素が用いられているため、宇宙用などごく限られた分野での利用に留まっていた。また、熱電材料をエネルギーハーベスティングへ本格利用することを考える場合、既存の熱電材料では廃熱量が多い 200 °C 以下の低温領域において熱電変換効率（無次元性能指数 ZT ）が低いという問題がある。

産業応用上の観点からは、地球上に豊富に存在し、かつ毒性の低い元素のみからなる高性能熱電材料の開発が求められる。Te や Se と同じ第 16 族元素の硫黄は、地殻中の存在度が Te や Se に比べはるかに高く、毒性も低い。2011 年に方輝銅鉱やデュルレ鉱などの硫化銅鉱物が比較的高い ZT (0.5@673K) を示す (Z.-H. Ge *et al.*, *Chem Commun.* **47**, 12697, 2011) ことが報告されて以来、四面銅鉱 (K. Suekuni *et al.*, *J. Appl. Phys.* **113**, 043712, 2013) やコルース鉱 (K. Suekuni *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 132107, 2014; *J. Mater. Chem. A* **4**, 15207, 2016) などの硫化銅鉱物がさらに高い ZT (~0.6@600K) を示すことが見出されている。しかし、Te や Se を用いた従来の熱電材料に比べるとまだ ZT が低いことが課題であり、実用化に向けては ZT の更なる改善が必須である。

ZT 向上の一つの方法論として階層的欠陥構造制御が注目されている。これは熱電材料内部に原子スケールからメソスケールに亘る様々な空間スケールの欠陥構造を導入し、パワーファクターを向上すると同時に格子熱伝導率 (κ_{lat}) を低減することで ZT を向上させる方法である。例えば、2012 年に Kanatzidis らは、階層的欠陥構造を有する PbTe-SrTe 系熱電材料を作製し、 $ZT \sim 2.2$ (@915K) を達成した (M. Kanatzidis *et al.*, *Nature* **489**, 414, 2012)。最近我々は銅スズ亜鉛硫化物 ($\text{Cu}_2\text{Sn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}_3$) のナノ粒子を化学合成し、このナノ粒子をパルス通電加圧焼結法によって焼結することで熱電材料を創製し、 Cu_2SnS_3 パルク結晶の約 10 倍の ZT 値 (0.37@673K) を達成した (S. Maenosono *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **111**, 263105, 2017)。さらに、電気伝導率 (σ) と熱伝導率 (κ) がどちらも高い $\text{Cu}_2\text{Sn}_{0.85}\text{Zn}_{0.15}\text{S}_3$ ($ZT=0.37$) と、 σ 及び κ がどちらも低い $\text{Cu}_2\text{Sn}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{S}_3$ ($ZT=0.33$) の 2 種類のナノ粒子を 9:1 の体積割合で配合して焼結することで、それぞれの長所を併せ持つ (高 σ かつ低 κ) ナノコンポジットの創製に成功し、 $ZT=0.64$ (@670K) を達成した (図 1) (S. Maenosono *et al.*, *ACS Appl. Nano Mater.* **10**, 31977, 2018)。

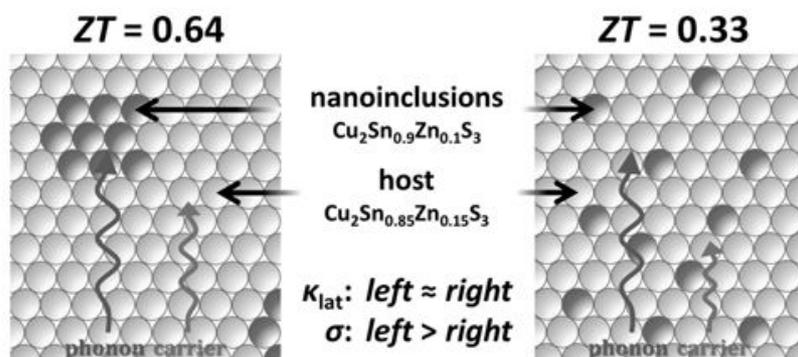


図 1 2 種類の銅スズ亜鉛硫化物ナノ粒子 ($\text{Cu}_2\text{Sn}_{0.85}\text{Zn}_{0.15}\text{S}_3$ と $\text{Cu}_2\text{Sn}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{S}_3$) を 9:1 の体積割合で配合して焼結したナノコンポジットの模式図 (左) ナノ粒子が凝集した状態で混合した場合 ($ZT=0.64$)、(右) ナノ粒子を粒子レベルで均一に混合した場合 ($ZT=0.33$)。

興味深いことに、同じ割合 (9:1) で配合した場合でも、それぞれのナノ粒子を粒子レベルで均一に混合した場合 (図 1 右) には ZT の向上は見られず、 $ZT=0.33$ (@670K) にとどまった。 ZT の大幅な向上が見られたのは、それぞれのナノ粒子がある程度凝集した状態で混合した時 (図 1 左) のみであった。このような振る舞いは有効媒質理論からは大きく外れるものであり、ホスト (この場合は $\text{Cu}_2\text{Sn}_{0.85}\text{Zn}_{0.15}\text{S}_3$) とナノインクルージョン (この場合は $\text{Cu}_2\text{Sn}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{S}_3$) の界面が ZT 向上に極めて重要な役目を果たしていることを示唆している。即ち、パワーファクターを低下させず、フォノン散乱を効率的に助長するために最適な海島構造 (島の大きさ、島間距離、海と島の境界の状態など) が存在し、海島構造を最適化することによって ZT を大きく改善することが可能であるということである。さらに、ホスト材料とナノインクルージョン材料の組み合わせによっては変調ドーピング効果も発現させ得るため、さらなる ZT 向上が期待できる。

こうした背景に鑑み、本研究では“ナノ・メソスケールの海島構造の構造パラメータが熱流及

び電流の輸送挙動にどのような影響を及ぼすのか？”という学術的な「問い」を立てた。この「問い」の解明は、熱電材料における輸送現象の理解に貢献し、計算科学とも融合して新たな学問分野の構築に資すると考えられる。また、この「問い」の解明の過程で得られる知見を活かして、400 °C 以下の温度領域で $ZT \sim 2$ の熱電変換性能を有し、かつサステイナブルな硫化物熱電材料の創製に繋がれば、産業応用上の要請にも応えることができる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、種々の硫化物ナノ粒子（希少元素や毒性元素を含まない）を化学合成し、それらのナノ粒子をビルディングブロックとして、従来の手法では作製することが極めて困難な階層的欠陥構造を有するナノコンポジット熱電材料を自在に創製し、ナノ・メソスケールの海島構造が熱流及び電流の輸送挙動に及ぼす影響を明らかにすることにある。

従来の熱電材料の製造法は、溶融法、粉末冶金法、物理気相成長など、比較的シンプルな手法に限られている。これらの手法は、純度が高く結晶性の良い化学量論的な熱電材料を作製するのには向いているものの、階層的欠陥構造を有する熱電材料を作製するのに向いている方法とは言い難い。一方、我々の提案するコロイド化学的手法（以下、コロイド法と呼ぶ）は、階層的欠陥構造を有する熱電材料を作製するのに適している。例えば、原子スケール欠陥（点欠陥）は、ナノ粒子への不純物ドーピングや不定比性制御によって容易に制御することができ、ナノスケール欠陥（結晶粒界）はナノ粒子の大きさや形状を変えることで精密に制御できる。メソスケール欠陥（ホスト-ナノインクルージョン構造）は、ホストとなるナノ粒子とインクルージョンとなるナノ粒子の組み合わせを選択したり、ナノ粒子凝集状態を調節したりすることで自在に制御できる。図2にその概念図を示す。

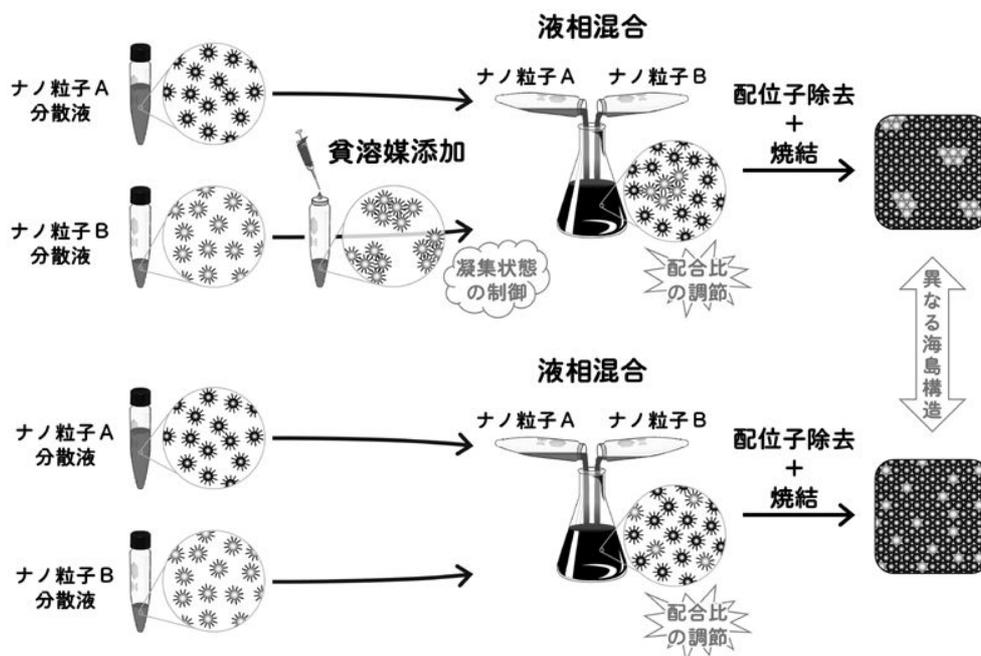


図2 コロイド法によるナノコンポジット熱電材料の作製スキーム。

まず、原子スケールの欠陥が導入された硫化物ナノ粒子 A と硫化物ナノ粒子 B をそれぞれ化学合成する。ナノ粒子 B をナノインクルージョンとしナノ粒子 A をホストとした場合、ナノ粒子 A の分散液中にナノ粒子 B の分散液を少量混合する。その際、ナノ粒子の表面配位子（単分散なナノ粒子の化学合成には必須）に応じて適切な貧溶媒を選択することでナノ粒子のコロイド分散安定性を制御し、所望の大きさの凝集体を予め形成させておく（図2 上段）。ナノ粒子 A とナノ粒子 B を配合比を調節して液相混合した後、遠心分離によってナノ粒子粉末を得る。表面配位子を除去後、パルス通電加圧焼結法によってペレット化する（図2 右）。ナノ粒子 B の分散状態の違いにより、同じ体積分率でも異なる海島構造を得ることができる。我々は既に種々の硫化物ナノ粒子の化学合成法と凝集状態の制御法を確立しており、これらのナノ粒子を任意の割合で配合することが可能である。

本研究では、硫化物系熱電材料をコロイド法によって創製することで階層的欠陥構造制御の自由度を高め、欠陥構造とフォノンの不純物散乱や界面散乱といったインコヒーレントな散乱過程との相関を実験的に明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、複数種類の p 型及び n 型の硫化物系ナノ粒子を化学合成し、それらを組み合わせ、多種多様なホスト - ナノインクルージョン構造を有する p 型及び n 型ナノコンポジット熱電材料を創製する。ナノ粒子の組成、大きさ、形状を変化させることで原子・ナノスケール欠陥構造を精密制御する。また、ナノインクルージョンとなるナノ粒子の凝集状態と配合比を変化させることでメソスケール欠陥構造を制御する。全ての組み合わせを網羅することは困難なため、計算科学の力も借りながら必要最小限の実験点で海島構造パラメータ（島の大きさ、島間距離、海と島の境界物性）が熱及びキャリアの輸送に及ぼす影響を明らかにする。

4. 研究成果

【p 型硫化物ナノ粒子】 $\text{Cu}_3\text{Zn}_{1-x}\text{Al}_x\text{SnS}_{5-y}$ ナノ粒子を化学合成し、このナノ粒子を焼結することで熱電材料を創製した。 $x=0$ ($\text{Cu}_3\text{ZnSnS}_{5-y}$) において最も高い ZT 値 (0.39@658K) を観測した。Cu-Zn-Sn-S 系化合物で最も良く知られた $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) の場合、これまで報告されている ZT 値は $ZT=0.026$ (@700K) であり、Cu ドープされた CZTS でも $ZT=0.14$ (@700K) (*Nano Lett.* 12, 540, 2012) であることから、Cu-Zn-Sn-S 系化合物としては最高の ZT 値を示した。一方、 $x=1$ の場合 [$\text{Cu}_3\text{AlSnS}_5$ (CATS)] では、熱伝導率が高くなり過ぎ ZT 値は低かったものの (0.12@668K)、極めて高い電気伝導率と低い格子熱伝導率を有しており、キャリア濃度を最適化することで ZT の向上が可能であることがわかった。キャリア濃度を調節するために Al を Ga で置換した $\text{Cu}_3\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{SnS}_5$ ナノ粒子を合成し焼結することで熱電材料を創製し、Ga 置換のキャリア輸送特性に及ぼす影響を調べた。その結果、 $x=0.5$ の場合に最も高い ZT 値 (0.26@665K) が得られた。また、 $\text{Cu}_3\text{AlSnS}_5$ (CATS) ナノ粒子に Cu_2SnS_3 (CTS) ナノ粒子をナノインクルージョンとして配合することで、CATS の極めて高い電気伝導率を大幅に低減させることに成功した。

この $\text{Cu}_3\text{ZnSnS}_{5-y}$ (CZTS) ナノ粒子をホスト、 Cu_2SnS_3 (CTS) 等の他の p 型熱電ナノ粒子をナノインクルージョンとして配合することで、出力因子を最適化して、ZT 値を最大化することを目的として、ナノインクルージョンの種類や配合比を変えながらその熱電特性を系統的に調査した。配合比を変えることで熱電特性は変化するものの、まだ ZT 値を大きく向上させることには成功していない。今後も検討を継続して行っていく。

また、p 型の硫化スズ (Sn-S) とセレン化スズ (Sn-Se) のナノ粒子の化学合成法を開発し、Sn-S については球状 SnS ナノ粒子、Sn-Se については p 型の SnSe ナノシートと n 型の SnSe_2 ナノシートを作り分けられる新たな合成法を開発した。また、SnS ナノ粒子をホットプレスにより焼結・ペレット化し、それらの熱電特性を産業総合技術研究所 ゼロエミッション国際共同研究センター 熱電変換・熱制御研究チームとの共同研究により評価したところ、ナノ構造化による熱伝導率の低減が認められた。SnS については電気伝導率が低かったため、キャリア密度を向上させる目的で Ag をドープすることを検討し、電気伝導率およびパワーファクターの向上に成功した。

【n 型硫化物ナノ粒子】 化学合成した CuFe_2S_3 及び CoSbS のナノ粒子を焼結することで、ナノ構造 n 型熱電材料の作製に成功した。格子熱伝導率を大幅に低減できたものの、組成ずれによって電気伝導率が高くなり、そのせいで出力因子がバルク材料に比べて低下したため、ZT 値は従来の報告と同等であった。また、化学合成した CoSbS ナノ粒子を焼結したペレットの電気伝導機構を調べた結果、低温領域 (<170 K) では Mott variable-rangehopping 伝導、高温領域 (>300 K) ではバンド伝導であることがわかり、S 欠損に由来するドナー準位が存在し、その伝導帯からの深さは 120 meV 程度であることを明らかにした。また、カルコパイライト (CuFeS_2) ナノ粒子に Ag ナノ粒子を配合して焼結した n 型熱電材料を作製し、その熱電特性と電気輸送特性を調査した。Ag ナノ粒子を添加することで、電気伝導率とゼーベック係数ともに増加するという興味深い現象を見出した。

また、 CuFeS_2 と、Zn または Se をドープした CuFeS_2 ($\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{FeS}_2$, $\text{CuFe}_2\text{S}_{1.5}\text{Se}_{0.5}$) ナノ粒子を湿式法により化学合成した。これらのナノ粒子を 500 °C で 15 分間、300 MPa の圧力でホットプレスを行い、ペレットを作製した。330~675K の温度領域におけるペレットの熱・電気輸送特性を測定した。Zn のドープ量を変えて性能を評価したところ、最も高い電気伝導率と出力因子を有する組成は $\text{Cu}_{0.85}\text{Zn}_{0.15}\text{FeS}_2$ であることが分かった。また、 CuFeS_2 の熱伝導率は閃亜鉛鉱型結晶構造に由来して先天的に高く、Se をドープすることで熱伝導率を低減することが可能であることが分かった。そこで、 $\text{Cu}_{0.85}\text{Zn}_{0.15}\text{FeS}_2$ を海に $\text{CuFe}_2\text{S}_{1.5}\text{Se}_{0.5}$ を島にしたナノ構造熱電材料を作製し、性能評価を行った。ペレットは質量比が 9:1 となるように $\text{Cu}_{0.85}\text{Zn}_{0.15}\text{FeS}_2$ と $\text{CuFe}_2\text{S}_{1.5}\text{Se}_{0.5}$ を配合し、ホットプレスをすることで得た。電気伝導率は高い値を維持できたが、熱伝導率が期待どおりには下がらなかった。結果として海島構造を有するペレットの ZT は CuFeS_2 や $\text{Cu}_{0.85}\text{Zn}_{0.15}\text{FeS}_2$ と比較して向上せず、662K で $ZT=0.17$ であった。

n 型 SnSe_2 ペレットについては、異方性が高いため、物質・材料研究機構 ナノアーキテクトニクス材料研究センター 熱エネルギー変換材料グループとの共同研究により、面内方向と面直方向の熱伝導率を測定した。その結果、面直方向の熱伝導率はバルクと同等であったが、面内方向の熱伝導率をバルクの半分以上まで低減することに成功した。また、直径 10 mmφ×高さ 12 mm の円柱状のペレットを作製し、ここから直径 10 mmφ×厚さ 2 mm の円盤状サンプルを、元の円柱に対して水平方向と垂直方向の 2 枚切り出し、これらの試料についてそれぞれゼーベック係数、

電気伝導率、熱伝導率を測定し、電気・熱輸送特性の異方性を評価することを現在検討中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Dwivedi Pratibha, Miyata Masanobu, Higashimine Koichi, Takahashi Mari, Zhou Wei, Ohta Michihiro, Maenosono Shinya	4. 巻 3
2. 論文標題 Effect of Gallium Substitution in Cu ₃ Al _{1-x} Ga _x Sn ₅ Nanobulk Materials on Thermoelectric Properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 5784 ~ 5791
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00730	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 Fei Shujie, Miyata Masanobu, Takahashi Mari, Dwivedi Pratibha, Zhou Wei, Ohta Michihiro, Maenosono Shinya	4. 巻 10
2. 論文標題 Thermoelectric properties of paracostibite fabricated using chemically synthesized Co-Sb-S nanoparticles as building blocks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 075021 ~ 075021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0012463	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Dwivedi Pratibha, Miyata Masanobu, Higashimine Koichi, Takahashi Mari, Ohta Michihiro, Kubota Korefumi, Takida Hiroshi, Akatsuka Takeo, Maenosono Shinya	4. 巻 4
2. 論文標題 Nanobulk Thermoelectric Materials Fabricated from Chemically Synthesized Cu ₃ Zn _{1-x} Al _x Sn _{5-y} Nanocrystals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 16402 ~ 16408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.9b01944	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakada Takeshi, Takahashi Mari, Shijimaya Chiko, Higashimine Koichi, Zhou Wei, Dwivedi Pratibha, Ohta Michihiro, Takida Hiroshi, Akatsuka Takeo, Miyata Masanobu, Maenosono Shinya	4. 巻 35
2. 論文標題 Gram-Scale Synthesis of Tetrahedrite Nanoparticles and Their Thermoelectric Properties	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 16335 ~ 16340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.9b03003	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18件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 M. Takahashi, S. Fei, M. Miyata, P. Dwivedi, W. Zhou, M. Ohta, and S. Maenosono
2. 発表標題 Thermoelectric Properties of Paracostibite Fabricated using Chemically Synthesized Co-Sb-S Nanoparticles as Building Blocks
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Takahashi, K. Numano, W. Zhou, M. Miyata, M. Ohta, and S. Maenosono
2. 発表標題 Improvement of Thermoelectric Performance via Hierarchical Defect Engineering using Nanoparticles as Building Blocks
3. 学会等名 化学工学会第52回秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Takahashi, K. Numano, W. Zhou, M. Miyata, M. Ohta, and S. Maenosono
2. 発表標題 Improvement of Thermoelectric Performance via Hierarchical Defect Engineering using Nanoparticles as Building Blocks
3. 学会等名 The 2021 MRS Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Takahashi, K. Numano, W. Zhou, M. Miyata, M. Ohta, and S. Maenosono
2. 発表標題 Improvement of Thermoelectric Performance via Hierarchical Defect Engineering using Nanoparticles as Building Blocks
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (MRM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 P. Dwivedi, M. Miyata, K. Higashimine, M. Takahashi, M. Ohta, K. Kubota, H. Takida, T. Akatsuka, and S. Maenosono
2. 発表標題 Cu ₃ AlSn ₅ Based Thermoelectric Materials with Cu ₂ Sn ₃ Nano-inclusions
3. 学会等名 日本化学会第100春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mari Takahashi, Shujie Fei, Masanobu Miyata, Pratibha Dwivedi, Wei Zhou, Michihiro Ohta and Shinya Maenosono
2. 発表標題 Thermoelectric Properties of Paracostibite Fabricated using Chemically Synthesized Co-Sb-S Nanoparticles as Building Blocks
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 W. Zhou, P. Dwivedi, K. Higashimine, M. Miyata, M. Ohta, H. Takida, T. Akatsuka, and S. Maenosono
2. 発表標題 Structure-Property Relations in Thermoelectric Nanobulk Materials Fabricated from Cu ₂ Sn ₃ Nanoparticles
3. 学会等名 38th Annual International Conference on Thermoelectrics and 4th Asian Conference on Thermoelectrics (ICT/ACT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 P. Dwivedi, W. Zhou, M. Ohta, M. Miyata, H. Takida, T. Akatsuka, and S. Maenosono
2. 発表標題 Nanobulk Thermoelectric Materials Fabricated from Chemically Synthesized Cu ₃ Al _{1-x} Zn _x Sn ₅ Nanocrystals
3. 学会等名 38th Annual International Conference on Thermoelectrics and 4th Asian Conference on Thermoelectrics (ICT/ACT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 P. Dwivedi, W. Zhou, M. Ohta, M. Miyata, H. Takida, K. Kubota, T. Akatsuka, and S. Maenosono
2. 発表標題 Synthesis of $\text{Cu}_3\text{Al}_{1-x}\text{M}_x\text{Sn}_5$ (M = Metal) Nanocrystals as Building Blocks for Sustainable Thermoelectric Materials
3. 学会等名 第70回コロイドおよび界面化学討論会 (Okinawa Colloids 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Numano, M. Singh, P. Dwivedi, M. Ohta, H. Takida, T. Akatsuka, and S. Maenosono
2. 発表標題 Chemical Synthesis of Cu - Fe - S Nanoparticles towards Sustainable N-type Thermoelectric Materials
3. 学会等名 第70回コロイドおよび界面化学討論会 (Okinawa Colloids 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Fei, P. Dwivedi, M. Miyata, M. Ohta, T. Akatsuka, and S. Maenosono
2. 発表標題 Chemical Synthesis of Co-Sb-S Nanoparticles and Fabrication of Nanostructured N-type CoSbS Thermoelectric Materials
3. 学会等名 第70回コロイドおよび界面化学討論会 (Okinawa Colloids 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沼野 公佑, M. Singh, 中田 豪, P. Dwivedi, 太田 道広, 瀧田 大, 赤塚 威夫, 前之園 信也
2. 発表標題 サステイナブル熱電材料創製に向けたCu-Fe-S系ナノ粒子の化学合成と評価
3. 学会等名 令和1年度北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Fei, P. Dwivedi, 太田 道広, 赤塚 威夫, 宮田 全展, 前之園 信也
2. 発表標題 Co-Sb-S系N型熱電ナノ粒子の化学合成と評価
3. 学会等名 令和1年度北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Moore, K. Kobayashi, M. Takahashi, and S. Maenosono
2. 発表標題 Chemical Synthesis and Structural Analysis of Tin Selenide Nanomaterials towards N-type Nanostructured Thermoelectric Materials
3. 学会等名 第73回コロイドおよび界面化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Moore, K. Kobayashi, M. Takahashi, and S. Maenosono
2. 発表標題 Simple Phase-selectable Chemical Synthesis of Tin Selenide Nanosheets Towards N-type Nanostructured Thermoelectric Materials
3. 学会等名 日本化学会 北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林 恵士, モーア サイモン, 高橋 麻里, 前之園 信也
2. 発表標題 サステイナブルなナノ構造熱電材料の創製に向けたSn-S系ナノ粒子の化学合成に関する検討
3. 学会等名 日本化学会 北陸地区講演会と研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 サイモン モーア, 小林 恵士, 高橋 麻里, 東嶺 孝一, 前之園 信也
2. 発表標題 ナノ構造熱電材料の創製に向けた結晶相選択可能なセレン化スズナノシートの化学合成法の開発
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林 恵士, S. Moore, P. Sauerschnig, 太田 道広, 高橋 麻里, 前之園 信也
2. 発表標題 SnSナノ粒子をビルディングブロックとして用いたナノ構造熱電材料の作製とその熱電特性評価
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023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
研究協力者	高橋 麻里 (Takahashi Mari)		
研究協力者	太田 道広 (Ohta Michihiro)		
研究協力者	宮田 全展 (Miyata Masanobu)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	森 孝雄 (Mori Takao)		

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