

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 9 月 12 日現在

機関番号：25503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06841

研究課題名(和文) ナノ界面・組織構造制御によるクラスレート複合熱電変換材料の創製

研究課題名(英文) Creation of Thermoelectric Clathrate Composites by Nanoscale Control of Interfaces and Textures

研究代表者

阿武 宏明(Anno, Hiroaki)

山陽小野田市立山口東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：60279106

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：省エネルギー・環境共生型社会への転換に向けて、膨大な量の未利用排熱を電気エネルギーに直接変換する熱電発電技術の実用化を加速させるため、本研究では高温領域の熱電素子材料として期待される半導体クラスレート材料のナノ界面・構造制御による革新的複合材料を創製し、熱電性能の飛躍的な向上を目指した。次の2つの新しい視点からの材料設計に関する有益な知見を得た。(1)ホスト構造を変調した新規のクラスレートの創製に成功し、それらの化合物においてpn制御ならびに熱電性能の向上を達成した。(2)ナノ界面・組織構造の導入により生じる界面ポテンシャルに起因するゼーベック係数の増加効果に関する知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

省エネルギー・環境共生型社会への転換に向けて、膨大な量の未利用排熱を電気エネルギーに直接変換する熱電発電の実用化の要求が高まっており、本研究は高温領域の熱電材料として有望な半導体クラスレートのナノ界面・構造制御により革新的複合材料を創製し、熱電変換効率の向上に寄与する有益な成果を得た。本研究で対象としたシリコン(Si)系クラスレートは資源量・コスト・環境安全性の応用上の観点からも有利な材料系であり、その性能向上に関する成果は熱電発電の実用化の観点からも意義がある。さらに、ナノ界面・構造の制御による熱電性能の向上に関して新たに得られた知見はナノ材料科学の発展にも寄与するものとして意義がある。

研究成果の概要(英文)：In order to accelerate the practical application of thermoelectric power generation technology that directly converts a huge amount of unused waste heat into electric energy toward the transition to an energy-saving and environmentally symbiotic society, we aimed to dramatically improve thermoelectric performance by creating an innovative composite material by controlling the nano-interface/structure of semiconductor clathrate materials, which are expected as thermoelectric element materials in the high temperature region. We obtained useful information about material design from the following two new viewpoints. (1) We succeeded in creating a new clathrate with a modulated host structure and achieved pn control and improved thermoelectric performance in these compounds. (2) We obtained knowledge about the effect of increasing the Seebeck coefficient due to the interfacial potential caused by the introduction of nano-interface/structure.

研究分野：電子材料工学、熱電変換工学、電子デバイス工学

キーワード：未利用排熱有効利用 熱電発電 クラスレート ゼーベック係数 導電率 熱伝導率 ナノ界面制御 界面ポテンシャル

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、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

熱電変換技術は、固体素子に熱流を通してゼーベック効果により熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換する技術で、無駄に放出されている排熱からエネルギーを回収して再利用するキートテクノロジーとして注目されている。東日本大震災原発事故以降、地球温暖化・環境問題と化石燃料枯渇の問題・省エネルギー対策とも絡んで、熱電変換技術に対する社会的ニーズは益々増えてきている。熱電材料の変換効率は、熱電性能指数  $Z=S^2\sigma/\kappa$  ( $S$  はゼーベック係数、 $\sigma$  は電気伝導率、 $\kappa$  は熱伝導率) によって評価される。つまり、取り出す電気出力が大きくなるように、熱電能と電気伝導率が大きく、温度差がつきやすいように熱伝導率が低い材料がよい。熱電材料設計の重要な指針は、材料の物質パラメータ  $B=m^{*3/2}\mu/\kappa_L$  を大きくすることである。ここで、 $m^*$  は有効質量、 $\mu$  はキャリア移動度、 $\kappa_L$  は格子熱伝導率である。現象論的な規則によると、共有結合性をもち、単位格子内に多数の原子を含み、重い元素から構成される化合物は、移動度と格子熱伝導率との比  $\mu/\kappa_L$  が大きい (Goldsmid 則という)。この指針に従って、従来の熱電材料は、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  や  $\text{PbTe}$  に代表されるように、熱伝導率の低い重金属化合物半導体が中心であった。しかし、1990年代から米国の Slack (CRC Handbook of Thermoelectrics, Ed. D.M.Rowe, (CRC, 1995) pp.407-440.) によって提唱された Phonon Glass Electron Crystal (PGEC) という概念による物質開発の試みが提案され、その一つにクラスレート (包接化合物) 半導体がある。クラスレート半導体は、内部に大きな空隙があるかご状の結晶構造をもち、空隙中に弱く結合した原子 (ゲスト) を含む物質であり、かごの中のゲスト原子の熱振動 (この現象を“ラットリング (rattling) ”という) によって熱を輸送するフォノンが強く散乱され熱伝導率が大幅に低下する、一方、結晶構造の骨格を形成するかご格子 (ホスト) が共有結合性のバンド構造を支配するため、良好な電気伝導性を有する。しかし、熱電材料として Si クラスレートは有望であるものの応用するための課題として、キャリア濃度の最適化制御が充分ではない点、Si クラスレートは n 型であるが熱電素子を構成するための良い p 型材料がない点などの課題がある。

熱電材料の開発において、舟橋ら (Appl. Phys. Lett. 82, 1851 (2003)) が報告した層状 Co 酸化物の開発で提案するミスフィット界面の例のように“空間ミスフィット”を材料に導入することにより、フォノンの散乱を誘発し熱伝導度の低減や界面ポテンシャルによる低エネルギー電子フィルタリングによるゼーベック係数増加など、熱電性能の向上に有効であることが期待される。

### 2. 研究の目的

本研究では申請者らのこれまでに蓄積したクラスレート熱電材料に関する研究成果を基にして、前述の“空間ミスフィット”の概念を半導体クラスレートにおいて展開・具体化させ、熱電性能を飛躍的に向上させるナノ界面・組織構造制御による革新的複合材料の創製に関する研究を遂行した。本研究では次のように研究目標を設定した。

#### (1) ホスト構造の変調を含む新規のクラスレートの創製

かご状のホストを種々の元素で置換しクラスレートにおける元素置換による構造と熱電特性への効果に関する基礎的な知見を得る。これによりホスト構造変調による電子構造の変調 (電子状態密度・有効質量の変化、バンドギャップエンジニアリングなど)、およびキャリアチューニングによるゼーベック係数の増大を試みる。

#### (2) ミスフィットを導入した新規クラスレート複合熱電材料の創製

クラスレート半導体に異種材料 (半導体、絶縁体など) からなる界面 (ミスフィット) を導入して、界面ポテンシャル・エネルギーフィルタリング効果、フォノンブロッキング効果を相乗的に発現するナノ界面・組織構造制御された複合材料 (ナノコンポジット) の創製について挑戦する。

### 3. 研究の方法

#### (1) ホスト構造の変調を含む新規のクラスレートの創製

##### ① 金属元素を含むホスト多元素置換系クラスレートの創製

キャリアタイプの制御とその濃度の最適化による高性能化を目標とし、Si-Ge 混晶系クラスレートにおいて、遷移金属元素を含む同時ドーピングによる熱電特性への効果を詳細に調べた。具体的には  $\text{Ba}_8\text{Au}_x\text{Ga}_y\text{Si}_{23}\text{Ge}_z$  化合物をアーク溶融法と放電プラズマ焼結 (SPS) 法を併用して作製し、熱電特性の組成依存性を調査した。

##### ② 新規 Cu-P 系クラスレート熱電半導体の創製

資源量豊富で安価な Cu を含む新規クラスレート材料の開発を目標とし、Cu-P および Ga-P 同時ドーピングによる新規 Cu-P 系クラスレートを作製し、その熱電特性の調査を実施した。具体的には  $\text{Ba}_8\text{Cu}_x\text{Ga}_y\text{Ge}_{46-x-y}\text{P}_z$  化合物をアーク溶融法と SPS 法を併用して作製し、熱電特性の組成依存性を調査した。

#### (2) ミスフィットを導入した新規クラスレート複合熱電材料の創製

##### ① DFT シミュレーションによるナノ界面・構造の導入効果の研究

熱電材料におけるナノ構造・界面と熱電特性との関係を解明することは熱電性能の飛躍的な向上に繋がる重要な課題である。クラスレート/異種材料/クラスレート材料のナノ界面構造モデルにおける輸送特性のシミュレーションを実施して、クラスレート系材料と異種材料とのナノ複合

化クラスレートによる熱電特性改善の可能性を検討した。輸送特性の計算においては非平衡グリーン関数 (NEGF) 法を活用した密度汎関数法 (DFT) に基づく計算を行った。計算には Quantum ATK (Version: 2018.06-SP1-1) パッケージを使用した。

## ② クラスレート系ナノ複合材料の創製

クラスレート材料のナノ化プロセスを開発するために、遊星ボールミル法により Si 系クラスレート  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{15}\text{Si}_{31}$  の微細化、および SPS 法による粒成長を抑制した高圧低温焼結のプロセス条件を検討した。

次に、異種材料との複合化について調査した。特に p 型クラスレート材料の熱電特性の向上を目指し、p 型クラスレート  $\text{Ba}_8\text{Au}_6\text{Si}_{40}$  と p 型硫化物材料との複合化 (コンポジット) 焼結体を作製し、その熱電特性について調査した。

## 4. 研究成果

### (1) ホスト構造の変調を含む新規のクラスレートの創製

#### ① 金属元素を含むホスト多元置換系クラスレートの創製

$\text{Ba}_8\text{Au}_x\text{Ga}_y\text{Si}_{23}\text{Ge}_z$  ( $x = 0\sim 6$ ) の Hall 測定の結果から、Au 仕込  $x = 0\sim 4$  にかけて Hall 係数は負で、Hall キャリア濃度は減少する傾向にあり、Au 仕込  $x = 4$  では、キャリア濃度が  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  のオーダーで従来の  $\text{Ba}_8\text{Ga}_x\text{Si}_{46-x}$  では実現されなかったキャリア濃度の低減に成功した。Au 仕込  $x = 5\sim 6$  では Hall 係数は正で、キャリア濃度が増加する傾向にあることが明らかとなった。つまり、新規の p 型クラスレートの合成にも成功した。

図 1 は  $\text{Ba}_8\text{Au}_x\text{Ga}_y\text{Si}_{23}\text{Ge}_z$  ( $x = 0\sim 6$ ) におけるゼーベック係数の温度依存性である。Au 仕込  $x = 0\sim 4$  ではゼーベック係数は負で試料は n 型であり、Au 仕込  $x = 5, 6$  ではゼーベック係数は正で試料は p 型で比較的高い値をもつことが明らかとなった。

熱電材料を高温度領域まで利用する場合には、バンドギャップの大きさが材料設計上のパラメータとして重要となる。 $\text{Ba}_8\text{Au}_x\text{Ga}_y\text{Si}_{23}\text{Ge}_z$  のバンドギャップを見積もったところ、 $0.22\sim 0.26 \text{ eV}$  であった。従来 p 型として知られている  $\text{Ba}_8\text{Au}_6\text{Si}_{40}$  のバンドギャップは  $0.12 \text{ eV}$  に対し、 $\text{Ba}_8\text{Au}_x\text{Ga}_y\text{Si}_{23}\text{Ge}_z$  のバンドギャップは大きく、Si-Ge の混晶によりバンドギャップが広がる効果があることを新たに見出した。このようにエネルギーギャップエンジニアリングの成果により、高温領域でのゼーベック係数の改善を明らかにした。

$\text{Ba}_8\text{Au}_x\text{Ga}_y\text{Si}_{23}\text{Ge}_z$  における格子熱伝導率の温度依存性を調査した。その結果、Au 仕込  $x = 6$  で格子熱伝導率は約  $0.5 \text{ W/(mK)}$  の低い値となった。この原因として、Au 置換に伴う有効質量の増加、特に Au 仕込  $x = 6$  でのホスト原子位置 6c サイトをほぼ占有した状態ではホストの電子系とフォノンとの相互作用が強められ、電子-フォノン散乱の効果が増強している可能性があり、格子熱伝導率を低減する新たな機構の発見につながる成果である。

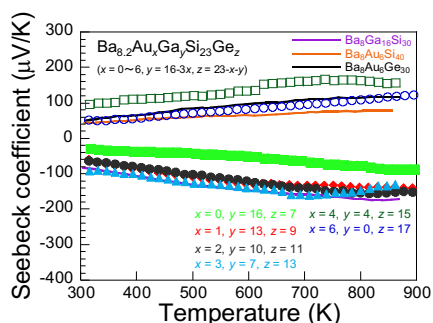


図 1  $\text{Ba}_8\text{Au}_x\text{Ga}_y\text{Si}_{23}\text{Ge}_z$  のゼーベック係数の温度依存性

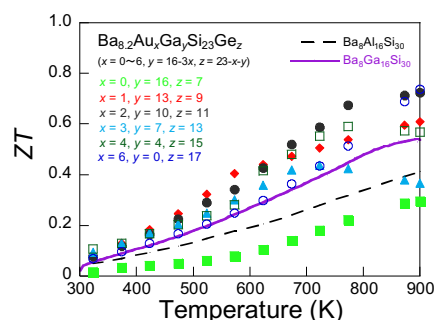


図 2  $\text{Ba}_8\text{Au}_x\text{Ga}_y\text{Si}_{23}\text{Ge}_z$  の無次元熱電性能指数  $ZT$  の温度依存性

図 2 は  $\text{Ba}_8\text{Au}_x\text{Ga}_y\text{Si}_{23}\text{Ge}_z$  における無次元熱電性能指数  $ZT$  の温度依存性である。比較データとして従来材料の  $\text{Ba}_8\text{Al}_{16}\text{Si}_{30}$  と  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Si}_{30}$  のデータを示す。Au 仕込  $x = 2$  と  $6$  でそれぞれ n 型と p 型で  $ZT$  は最大となり、 $ZT =$  約  $0.73$  ( $900 \text{ K}$ ) となった。 $\text{Ba}_8\text{Al}_{16}\text{Si}_{30}$  と  $x = 2, 6$  の試料を比較すると約 1.8 倍、 $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Si}_{30}$  と比較すると約 1.3 倍の向上を達成した。

#### ② 新規 Cu-P 系クラスレート熱電半導体の創製

粉末 X 線回折測定の結果、全ての  $\text{Ba}_8\text{Cu}_x\text{Ga}_y\text{Ge}_{46-x-y-2}\text{P}_z$  ( $x = 5; y = 1\sim 3; z = 1$ ) 試料において主相はクラスレート相であることを確認した。なお、微量ではあるが不純物相として Ge が確認できた。EPMA により試料は P を含有していることが確認できた。

図 3 および図 4 にそれぞれ  $\text{Ba}_8\text{Cu}_x\text{Ga}_y\text{Ge}_{46-x-y-2}\text{P}_z$  ( $x = 5; y = 1\sim 3; z = 1$ ) のゼーベック係数および電気伝導率の温度依存性を示す。ゼーベック係数は  $y = 1$  で最大となり、 $600 \text{ K}$  において約  $300 \mu\text{V/K}$  と高い値であった。また、先行研究  $\text{Ba}_8\text{Cu}_5\text{Ge}_{41}$  と比べて  $y = 1$  および  $y = 3$  は低温側でゼーベック係数がピークとなる特性が得られた。電気伝導率は  $y = 2$  において先行研究と同程度の高い電気伝導率が得られた。

$\text{Ba}_8\text{Cu}_x\text{Ga}_y\text{Ge}_{46-x-y-2}\text{P}_z$  ( $x = 5; y = 1\sim 3; z = 1$ ) の出力因子  $PF$  は  $y = 2$  で最大となり、 $650 \text{ K}$  において約  $12 \mu\text{W}/(\text{cm}^2\text{K}^2)$  となり、先行研究の  $\text{Ba}_8\text{Cu}_5\text{Ge}_{41}$  と比べて 2.1 倍の大幅な性能向上に成功した。

$\text{Ba}_8\text{Cu}_x\text{Ga}_y\text{Ge}_{46-x-y-2}\text{P}_z$  ( $x = 5; y = 1\sim 3; z = 1$ ) の熱伝導率は  $y = 3$  で最も低く、 $570 \text{ K}$  において  $\kappa =$

0.98 W/(mK) であった。この値は先行研究の  $\text{Ba}_8\text{Cu}_5\text{Ge}_41$  と比べてやや低い値であった。 $\text{Ba}_8\text{Cu}_x\text{Ga}_y\text{Ge}_{46-x-y-z}\text{P}_z$  ( $x=5; y=1\sim3; z=1$ ) の無次元性能指数  $ZT$  の温度依存性から、 $y=2$  において  $ZT$  は最大で 0.63 (650 K) であった。この値は先行研究の  $\text{Ba}_8\text{Cu}_5\text{Ge}_41$  の 1.3 倍であり、熱電性能の大幅な向上に成功した。

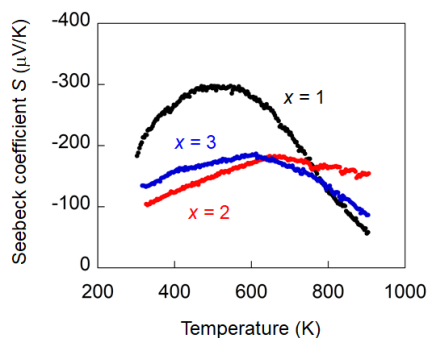


図3  $\text{Ba}_8\text{Cu}_x\text{Ga}_y\text{Ge}_{46-x-y-z}\text{P}_z$  ( $x=5; y=1\sim3; z=1$ ) のゼーベック係数の温度依存性

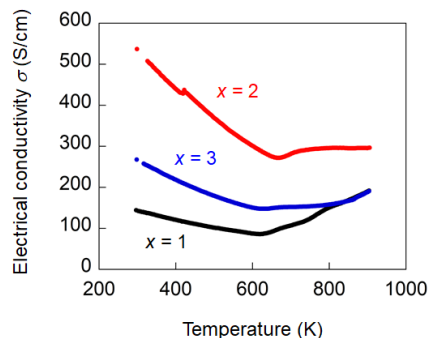


図4  $\text{Ba}_8\text{Cu}_x\text{Ga}_y\text{Ge}_{46-x-y-z}\text{P}_z$  ( $x=5; y=1\sim3; z=1$ ) の電気伝導率の温度依存性

(2) ミスフィットを導入した新規クラスレート複合熱電材料の創製

① DFT シミュレーションによるナノ界面・構造の導入効果の研究

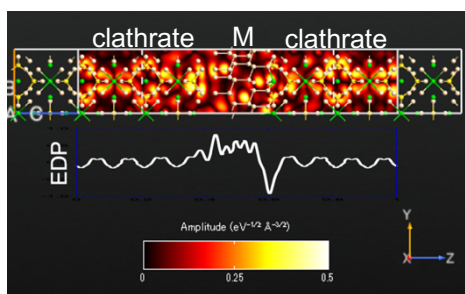


図5 クラスレート/異種材料 M/クラスレート ナノ界面構造モデル

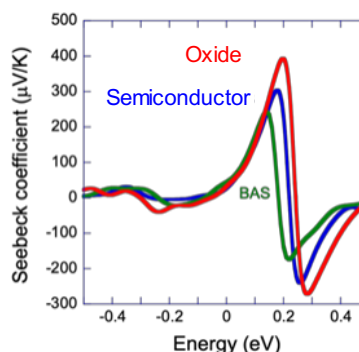


図6  $\text{Ba}_8\text{Au}_6\text{Si}_{40}/\text{M}/\text{Ba}_8\text{Au}_6\text{Si}_{40}$  (M=semiconductor, Oxide) ナノ界面構造におけるゼーベック係数

図5は NEGF+DFT 計算に用いたクラスレート/異種材料 M/クラスレートのナノ界面構造を示す。図5にはナノ界面構造と共にエネルギー  $E=0$  における透過係数（固有状態）の強度分布、および静電ポテンシャル差（Electrostatic Difference Potential: EDP）を表示している。シミュレーションの結果から、クラスレート/異種材料/クラスレートのナノ界面をキャリアが伝搬するとき、界面におけるポテンシャル変化が大きいたことが明らかとなった。

図6はクラスレート/異種材料/クラスレートのナノ界面構造におけるゼーベック係数の化学ポテンシャル依存性であり、異種材料 M がいない場合の結果（BAS:  $\text{Ba}_8\text{Au}_6\text{Si}_{40}$ ）と比較している。この結果から、クラスレートよりもエネルギーギャップの大きい半導体や酸化物のナノ界面を有する構造においてゼーベック係数が増加する可能性があることが示された。

② クラスレート系ナノ複合材料の創製

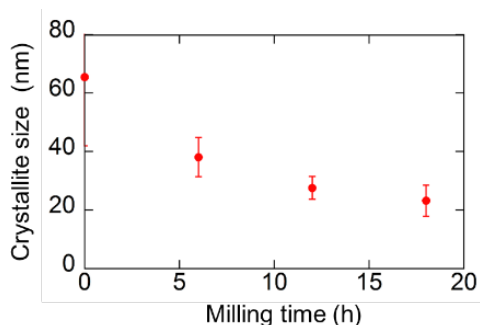


図7 結晶子サイズの遊星ボールミル時間依存性

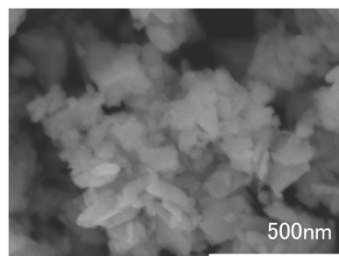


図8  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{15}\text{Si}_{31}$  のナノ粒子焼結体の走査電子顕微鏡写真

湿式遊星ボールミル法を用いて n 型 Si クラスレート  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{15}\text{Si}_{31}$  の微細化プロセスを検討した。ナノサイズの微細化が可能となるビーズサイズ、回転数、ミル時間の条件を見出した。

Si クラスレート  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{15}\text{Si}_{31}$  のナノ粒子を放電プラズマ焼結法により高圧低温焼結し、その熱

電特性について調査した。焼結体の結晶子サイズ (図 7) および粒径 (図 8) は、遊星ボールミルのミル時間を制御することで小さくすることができることを明らかにした。このとき、焼結体の格子定数は殆ど変わらないことからクラスレートの組成に変化が殆どないことも確認した。

図 9 に遊星ボールミルにより調製した  $\text{Ba}_8\text{Ga}_{15}\text{Si}_{31}$  ナノ粒子を焼結した試料のゼーベック係数の温度依存性を示す。遊星ボールミルによるナノ化処理のない場合 (0 h) と比べてナノ化処理した場合の焼結体は低温度領域のゼーベック係数が約  $-110 \mu\text{V/K}$  へ増大した。原因として粒界ポテンシャル障壁によるエネルギーフィルタリング効果が示唆される。

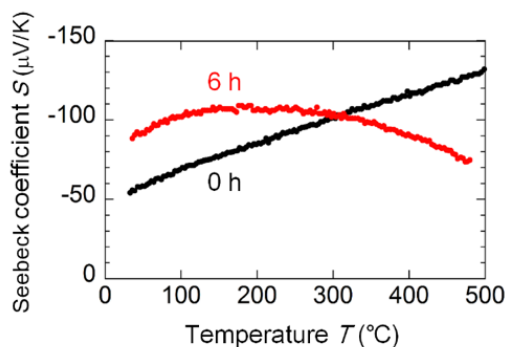


図 9 ゼーベック係数の温度依存性

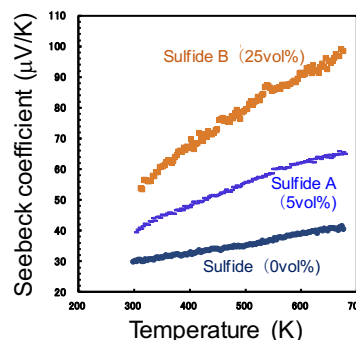


図 10 クラスレートコンポジットのゼーベック係数の温度依存性

次に p 型クラスレート ( $\text{Ba}_8\text{Au}_6\text{Si}_{40}$ ) と p 型硫化物との複合化について検討した。p 型クラスレートの遊星ボールミルによるナノ化プロセスを検討した。ナノ粒子を得ることができたが、そのナノ粒子を焼結するとクラスレート相が分解することが判明した。そのため、p 型クラスレートのマイクロ粒子と p 型硫化物として 2 種類 A (ナノ粒子)、B (マイクロ粒子) との複合化 (コンポジット) を検討した。焼結の際の粒成長の抑制のために高圧低温焼結の条件を一定として、p 型クラスレートのマイクロ粒子の焼結体 (硫化物 0 vol%) と p 型クラスレートのマイクロ粒子と p 型硫化物 A (ナノ粒子) のコンポジット、p 型クラスレートのマイクロ粒子と硫化物 B (マイクロ粒子) のコンポジットの熱電特性を調査した。それらの結果から出力因子が最も高かった硫化物 A (ナノ粒子 5vol%) 添加と硫化物 B (マイクロ粒子 25vol%) 添加の場合の結果を比較する。

図 10、図 11、および図 12 はそれぞれ上記試料のゼーベック係数、電気伝導率、および ZT の温度依存性である。ゼーベック係数の向上効果が高いのは硫化物 B マイクロ粒子 (25vol%) とのコンポジットの場合であるが、電気伝導率の低下が大きいので、結果として出力因子が向上するのは硫化物 A ナノ粒子 (5vol%) とのコンポジットの場合であることが明らかとなった。熱伝導率への影響は、硫化物 B マイクロ粒子 (25vol%) とのコンポジットも硫化物 A ナノ粒子 (5vol%) とのコンポジットの場合も同様に無添加の場合 (0vol%) から増加した。その結果、ZT は硫化物 A ナノ粒子 (5vol%) とのコンポジットの方が高い結果となった。

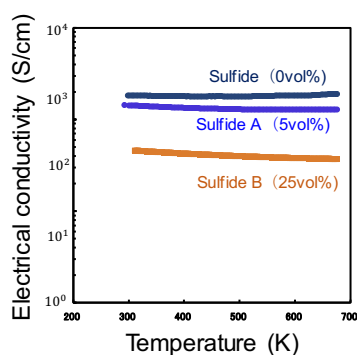


図 11 クラスレートコンポジットの電気伝導率の温度依存性

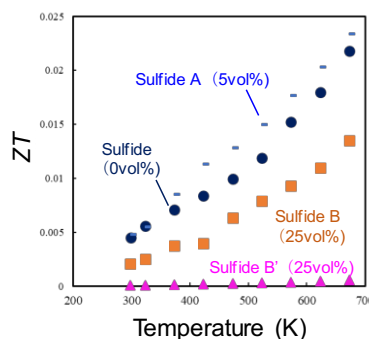


図 12 クラスレートコンポジットの ZT の温度依存性

以上より、p 型クラスレートを p 型硫化物とコンポジットすることにより、ゼーベック係数を向上させる効果のあることが見出された。しかし、同時に電気伝導率の低下と熱伝導率の増加を伴うために熱電性能の大幅な向上には至らなかった。コンポジットする材料の最適化、さらにナノ粒子サイズの最適制御やキャリア散乱の原因となる異種材料間の界面組織構造の最適化、焼結密度の改善などプロセス開発の課題を解決すれば、性能の向上の可能性があると考えられる。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 阿武宏明	4. 巻 3
2. 論文標題 非平衡グリーン関数法を活用した密度汎関数理論によるBa8Au6Si40クラスレートの熱電特性の計算	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 山陽小野田市立山口東京理科大学紀要	6. 最初と最後の頁 7-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 1件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Hiroaki Anno and Kazuya Okamoto
2. 発表標題 Calculation of Transport Properties of Nano Silicon Clathrate System on Density Functional Theory and Non-Equilibrium Green's Function Method
3. 学会等名 The 38th International Conference on Thermoelectrics and The 4th Asian Conference on Thermoelectrics (ICT/ACT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Anno and Kazuya Okamoto
2. 発表標題 Transport Properties of Silicon Clathrate System with Nano Scale Interface Calculated by Density Functional Theory and Non-Equilibrium Green's Function Method
3. 学会等名 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (PACRIM13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿武宏明, 岡本和也
2. 発表標題 密度汎関数理論によるBa8Cu6Ge38P2クラスレートの熱電特性の計算
3. 学会等名 第16回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本和也, 阿武宏明
2. 発表標題 (Cu, Ga) - P同時添加によるBaCuGe系クラスレートの熱電特性への影響
3. 学会等名 第16回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本和也, 古賀雄大, 阿武宏明
2. 発表標題 Ba8Cu5GaxGe40 - xPクラスレートにおけるGa添加量による熱電特性への影響
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroaki Anno, Gensei Miyagawa, Risa Maejima, and Kazuya Okamoto
2. 発表標題 Thermoelectric Properties of Si-Based Clathrates Prepared by Spark Plasma Sintering of Planetary-Ball-Milled Powders
3. 学会等名 The 37th Annual International and 16th European Conference on Thermoelectrics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡本和也, 阿武宏明
2. 発表標題 遊星ボールミル法によるSi系クラスレート粉末の焼結体の弾性定数
3. 学会等名 第15回日本熱電学会学術講演会(TSJ2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿武宏明, 岡本和也
2. 発表標題 非平衡グリーン関数法によるSiクラスレートの輸送特性の計算
3. 学会等名 2019年第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本 和也, 阿武 宏明
2. 発表標題 表面電位顕微鏡によるシリコン系クラスレートの仕事関数測定
3. 学会等名 2019年第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Anno, Risa Maejima and Kazuya Okamoto
2. 発表標題 Tuning of Chemical Composition and Thermoelectric Properties for Si-Based Clathrate System by Multi-Element Substitution Including Gold
3. 学会等名 The 36th International Conference on Thermoelectrics (ICT2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroaki Anno, Risa Maejima and Kazuya Okamoto
2. 発表標題 Thermoelectric Properties of Si-Based Multinary Clathrate Systems
3. 学会等名 The International Union of Materials Research Society-International Conference of Advanced Materials 2017 (IUMRS-ICAM 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Risa Maejima, Kazuya Okamoto and Hiroaki Anno
2. 発表標題 Effects of Au Substitution on Thermoelectric Properties of Type-I Clathrate Si-Ge Mixed Crystal System
3. 学会等名 The International Union of Materials Research Society-International Conference of Advanced Materials 2017 (IUMRS-ICAM 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡本和也, 前島理佐, 阿武宏明
2. 発表標題 微細構造を有するシリコン系クラスレート焼結体の作製
3. 学会等名 2017年(平成29年)第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 阿武宏明, 前島理佐, 岡本和也, 山本淳
2. 発表標題 シリコン系クラスレート多元化合物の高温熱電特性
3. 学会等名 第14回日本熱電学会学術講演会(TSJ2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡本和也, 前島理佐, 阿武宏明
2. 発表標題 Auを含む多元素置換Si系クラスレートの弾性定数
3. 学会等名 第14回日本熱電学会学術講演会(TSJ2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡本和也, 宮川玄聖, 前島理佐, 阿武宏明
2. 発表標題 遊星ボールミル法によるSi系クラスレート粉末の焼結体における熱電特性
3. 学会等名 2018年(平成30年)第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 飯田努, 塩尻大士, 阿武宏明	4. 発行年 2019年
2. 出版社 株式会社エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 403
3. 書名 サーマルデバイス	

〔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
研究分担者	岡本 和也  (Okamoto Kazuya)  (70756113)	山陽小野田市立山口東京理科大学・工学部・助教    (25503)	