

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03398

研究課題名(和文) 金属粒相制御による $ZT=2$ を超える高性能コンポジット熱電変換材料の開発への挑戦研究課題名(英文) Development of metal/Mg<sub>2</sub>Si composite materials with high thermoelectric efficiency

研究代表者

林 慶 (HAYASHI, Kei)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70360625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：Mg<sub>2</sub>Si系熱電材料の出力因子PFと無次元性能指数 $zT$ を向上するために、金属粒相を導入してコンポジット化した。金属としてMg、Al、Niを検討したところ、有効媒質理論ではすべての場合でPFと $zT$ が向上すると予想されたが、実際に作製したコンポジットではMgとAlの場合で向上した。この理由として、金属/Mg<sub>2</sub>Siの界面における微細組織と障壁高さが関与していることを明らかにした。最大の $zT$ はAl/Mg<sub>2</sub>Siコンポジット試料で得られた。Al粒相を微細化して、電気伝導率の増加と熱伝導率の低減を実現し、Al部分置換試料よりも高い $zT=0.6$  (800 K)を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、金属粒相を用いてMg<sub>2</sub>Siの出力因子PFと無次元性能指数 $zT$ を両方向上できることが明らかになった。微細組織の形態を制御することで、電気伝導率の増加だけでなく、熱伝導率を低減することができる。本成果は、Mg<sub>2</sub>Siだけでなく、他の熱電材料にも適用できることから、高効率の熱電材料開発を加速するとともに、化石燃料を使用せず、有害ガスや騒音を出さないクリーンな熱電発電の普及に貢献するものと期待される。

研究成果の概要(英文)：We prepared composite thermoelectric materials consisting of Mg<sub>2</sub>Si and metal to enhance power factor PF and dimensionless figure-of-merit  $zT$  of Mg<sub>2</sub>Si. As a metal, Mg, Al, and Ni were selected. According to the effective-medium theory, it was predicted that PF and  $zT$  are enhanced for all these metals; however, it is valid for the Mg/Mg<sub>2</sub>Si and Al/Mg<sub>2</sub>Si composite materials. In the case of Ni, PF and  $zT$  decreased by preparing the Ni/Mg<sub>2</sub>Si composite material. This is due to difference in microstructures and barrier heights at the interface between Mg<sub>2</sub>Si and metal. The maximum  $zT$  value of 0.6 (800 K) was obtained for the Al/Mg<sub>2</sub>Si composite material by the refinement of the microstructure of the dispersed Al metal phase in Mg<sub>2</sub>Si, which lead to increase in electrical conductivity and decrease thermal conductivity. This value was higher than an partially Al-substituted Mg<sub>2</sub>Si materials.

研究分野：応用物性・結晶工学

キーワード：熱電変換 コンポジット 金属相 マグネシウムシリサイド

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化現象や化石燃料の大量消費を解決するために、温室効果ガスを出さず排熱から電気エネルギーを得ることができる熱電発電の実現が求められている。排熱を使って p 型と n 型の熱電材料の両端に温度差をつけると、ホールと電子が高温側から低温側へと移動し、電気エネルギーが得られる。

近年、熱電材料として、従来の熱電変換効率の高い熱電材料(Pb や Te を含む)ではなく、安価で毒性が低く軽量の  $Mg_2Si$  系半導体が注目されている(図 1)。熱電性能は、無次元性能指数  $zT (= S^2\sigma T/\kappa)$  を用いて評価される。ここで、 $S$ 、 $\sigma$ 、 $T$ 、 $\kappa$  は、ゼーベック係数(温度差 1 K で生じる電圧)、電気伝導率、絶対温度、熱伝導率であり、 $zT$  が大きいほど熱電変換効率は高くなる。これまで、Sn 置換や Sb 添加で主に電子キャリア密度を増やして、出力因子 PF ( $= S^2\sigma$ ) を最大にしたり(文献 )、ナノ構造を導入して熱伝導率を低減したりして(文献 )、 $zT$  の向上が行われてきた(文献 )。

$Mg_2Si$  系熱電材料の性能を向上するための新しい指針を構築するには、 $Mg_2Si$  自体の結晶構造を詳細に調べる必要がある。我々は、単結晶 X 線回折(XRD)を用いることにより、 $Mg_2Si$  の格子間サイトに Mg が少量存在する( $Mg_i$ )ことを発見した(文献 )。  $Mg_i$  は電子ドーパントとして働くが、 $Mg_2Si$  の熱電性能は  $Mg_i$  量よりも、第 2 相として存在する粒界の Mg 量に依存していることがわかった(文献 )。したがって、粒界相を適切に選択してコンポジット化することで、 $Mg_2Si$  系熱電材料の性能を大幅に向上できると期待される。

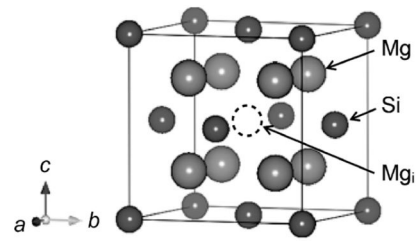


図 1  $Mg_2Si$  の結晶構造。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、 $Mg_2Si$  系熱電材料の性能を飛躍的に向上するために、部分置換・不純物添加・ナノ構造の導入といった従来の方法ではなく、金属粒界相を導入するという新しい方法を確立することである。そのために、 $Mg_2Si$  系熱電材料とコンポジット化する金属種の選択指針や熱伝導率の低減法に関する知見を得る。また、母相の結晶構造や物性の変化も同時に調査する。

### 3. 研究の方法

$Mg_2Si$  系熱電材料の試料作製は、固相反応法で行った。また、関連物質として、B ドープ  $Mg_2Si$  単結晶と  $Mg_2Sn$  単結晶を溶融合成法で作製した。

ケルビンプローブフォース顕微鏡で金属と  $Mg_2Si$  の界面における障壁高さを測定した。微細組織観察には、走査型電子顕微鏡(SEM)と透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた。結晶構造解析には、粉末 XRD と単結晶 XRD を用いた。単結晶 XRD では、多結晶あるいは単結晶の試料から、数 10 マイクロメートルサイズの微小な単結晶を採取して実施した。また、 $S$ 、 $\sigma$ 、 $\kappa$  の各熱電性能の測定は、300 K から 850 K の温度範囲で行った。B ドープ  $Mg_2Si$  においては、B のドーパントサイトを決定するために白色中性子ホログラフィーを利用した。

### 4. 研究成果

#### (1) 金属粒界相の選択

一般化有効媒質理論を用いて、金属相を Al, Bi, Co, Hg, K, Mg, Na, Ni, Pd, Pt, Rb としたときの、金属/ $Mg_2Si$  コンポジット試料の熱電性能を計算した(図 2)。300 K において、出力因子が向上した元素は Al, Bi, Co, K, Mg, Ni, Pd であった。さらに、300 K において無次元性能指数  $zT$  も向上した元素は Bi, Co, K, Ni であった。以上の結果から、金属粒界相として Mg, Al, Ni を選択することに決定した。

#### (2) 金属/ $Mg_2Si$ 界面の微細構造、界面抵抗、障壁高さ

Mg, Al, Ni を金属粒界相  $Mg_2Si$  の界面における微細組織と熱電性能の関係を調査した。微細組織の変化は、界面における障壁高さの変化をもたらし、電気伝導や熱伝導に影響を与えられられる。

コンポジットのモデル構造として、Mg/ $Mg_2Si$ 、Al/ $Mg_2Si$ 、Ni/ $Mg_2Si$  積層試料を作製し、界面の障壁高さを実測した(図 3)。Mg/ $Mg_2Si$  積層試料では、電位は  $Mg_2Si$  相より Mg 相の方が約 400 meV 高いことがわかった。つまり、Mg/ $Mg_2Si$  界面はオーミック接合であると結論できる。一方、Al/ $Mg_2Si$  積層試料では、電位は  $Mg_2Si$  相より Al 相の方が約 120 meV 低いことがわかった。これは、Al/ $Mg_2Si$  界面がショットキー接合であることを示している。また、Ni/ $Mg_2Si$  積層試料では、 $Mg_2Si$  相よりも Ni 相の方が約 170 meV 低いことから、Ni/ $Mg_2Si$  界面もショットキー接合であると結論できる。

実際に、我々の研究から Mg 粒界相の導入によって電気伝導率が増加することがわかっており

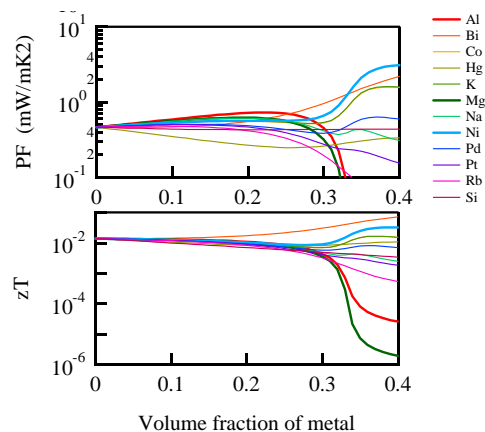


図 2 有効媒質理論を用いて計算した金属/ $Mg_2Si$  の熱電性能。

(文献 )、Mg/Mg<sub>2</sub>Si 界面がオーミック接触であることと矛盾しない。Ni/Mg<sub>2</sub>Si コンポジット材料では PF が減少しており(後述)、ショットキー接合の Ni/Mg<sub>2</sub>Si 界面で電気伝導キャリアが散乱されていることが示唆される。その一方で、同様に Al/Mg<sub>2</sub>Si 界面でショットキー接合となる Al/Mg<sub>2</sub>Si コンポジット材料では PF が増加する結果を得ており(文献 )、Ni/Mg<sub>2</sub>Si コンポジット材料とは反対の結果となっている。これは、Al/Mg<sub>2</sub>Si 界面のショットキー障壁が Ni/Mg<sub>2</sub>Si 界面よりも低いため、室温以上の高温ではキャリア散乱が抑制されたと考えれば説明できる。以上から、PF の増大は界面がショットキー接触でも起きるが、障壁高さに上限があると結論した。

さらに、Ni/Mg<sub>2</sub>Si コンポジット試料の界面における微細構造と電気輸送特性を詳細に調べるために、焼結温度を変えて Ni/Mg<sub>2</sub>Si 積層試料を作製した。SEM と TEM による微細組織観察から、Ni と Mg<sub>2</sub>Si の界面は急峻ではなく、Ni が Mg<sub>2</sub>Si 側に拡散しており、Ni から数 10 ~ 数 100 μm までの領域に Ni-Mg-Si 化合物が存在していることがわかった。Ni-Mg-Si 化合物が存在している領域の幅は、焼結温度が高いほど広がった。また、界面における電気輸送特性を調べたところ、Ni と Ni-Mg-Si 化合物が存在している領域の間に抵抗のとびが見られた。さらに、Ni-Mg-Si 化合物が存在している領域を超えると、抵抗が急激に増加した。この、界面における化合物相が、Ni/Mg<sub>2</sub>Si 界面における高い障壁高さの原因であると考えられる。

### (3) 金属/Mg<sub>2</sub>Si の熱電性能

Mg<sub>2</sub>Si を母相とする n 型のコンポジット試料の熱電性能を調査するとともに、p 型のコンポジット試料の作製を試みた。

固相反応法で(Mg<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Si 試料を作製したところ、x=0 以外の全ての試料で Al 相が確認され、格子定数に有意な変化がみられなかったことから、Al/Mg<sub>2</sub>Si コンポジット試料になっていることがわかった。この試料の熱電性能を測定した結果、電気伝導率の増加を反映して、Mg<sub>2</sub>Si よりも高い PF を得た。これまでに我々が放電プラズマ焼結で作製した 0.75Al/Mg<sub>2</sub>Si コンポジット試料(文献 )よりも zT は高くなり、(Mg<sub>0.98</sub>Al<sub>0.02</sub>)<sub>2</sub>Si 試料で最大の zT = 0.60 (800 K)を達成した。1 μm サイズ以下の Al 相が Mg<sub>2</sub>Si の粒界に存在していて、網目状構造を形成していることが PF と zT の増大につながったと考えられる。

次に、小さい粒径(1~10 μm)の Ni 相を分散させた、Ni/Mg<sub>2</sub>Si コンポジット試料を作製した。熱電性能を測定したところ、Mg<sub>2</sub>Si と比較して、0.01Ni/Mg<sub>2</sub>Si コンポジット試料の電気伝導率は減少、ゼーベック係数は増加した。この結果は、Ni の体積分率が大きくなるほど電気伝導率は増加、ゼーベック係数は減少する有効媒質理論の結果と一致しない。これは、1~10 μm 程度の Ni 分散相のサイズでは、Ni 分散相と母相の Mg<sub>2</sub>Si の界面の障壁高さが、電気伝導を阻害しない程度まで低くなっていないためであると予想される。以上のことから、Ni/Mg<sub>2</sub>Si コンポジットで高い PF と zT を得るためには、分散相の Ni の粒径をさらに細かくする、あるいは Ni の体積分率を 30% よりも多くすることが必要であると結論した。

Zn を金属相としてコンポジット試料を作製したところ、ゼーベック係数が正になったことから p 型のコンポジット試料の作製に成功した。Zn/Mg<sub>2</sub>Si コンポジット試料の PF は、Al/Mg<sub>2</sub>Si に匹敵する数 mW/mK<sup>2</sup>であった。

### (4) Mg<sub>2</sub>Si 系熱電材料の点欠陥と熱電性能

母相の Mg<sub>2</sub>Si の性能を上げたいので、金属とコンポジット化すれば、高い PF と zT が得られると考えられる。Mg<sub>2</sub>Si 多結晶に B をドーピングすると熱電性能が向上したことから(文献 )、B ドープ Mg<sub>2</sub>Si 単結晶を作製した。中性子ホログラフィーにより(図 4)、B は Mg サイトを置換し、電子キャリアを供与する可能性が示唆された。しかし、同時に点欠陥として Si 欠損が生じたため電子キャリアは逆に減少し、B ドープによる熱電性能の向上は見られなかった。

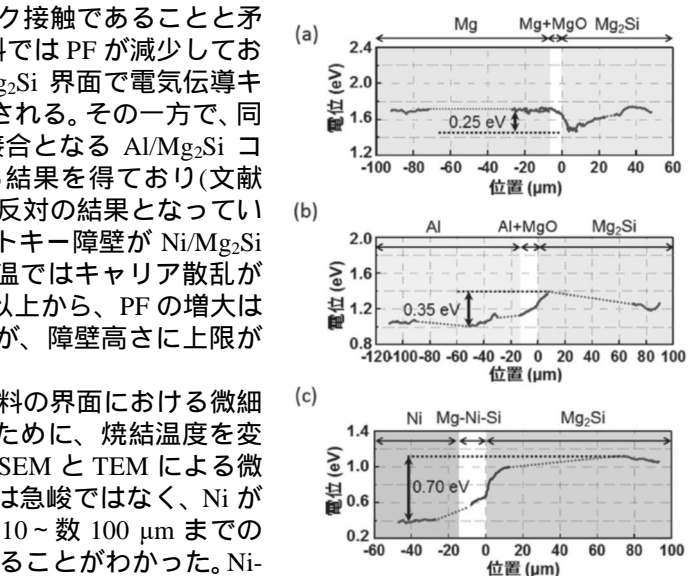


図 3 金属/Mg<sub>2</sub>Si 界面の電位分布。  
(a)Mg、(b)Al、(c)Ni。

Mg<sub>2</sub>Si と同じ結晶構造をもつ Mg<sub>2</sub>Sn において、コンポジット化が有効か検討するために、Mg<sub>2</sub>Sn

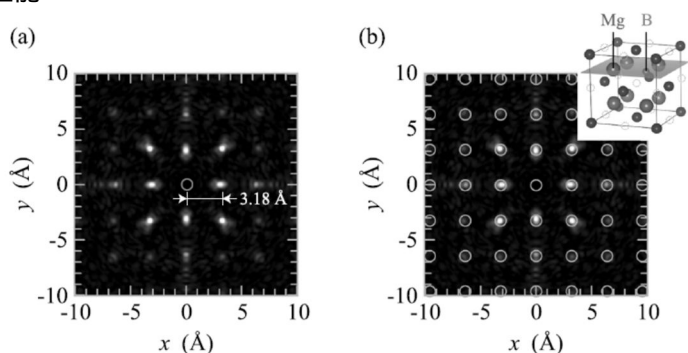


図 4 (a)B ドープ Mg<sub>2</sub>Si 単結晶の、B 周辺の原子イメージ。  
(b)Mg サイトとの比較。

の結晶構造を調査した。単結晶 XRD の結果、 $Mg_2Sn$  には  $Mg$  欠損( $V_{Mg}$ )が存在し、熱伝導率を大きく低減するのに有効であることを見出した。一方、 $V_{Mg}$  はゼーベック係数と電気伝導率には大きな影響を与えなかったことから、コンポジット化で熱電性能を向上できる可能性が示唆された。

以上、(1)から(3)の研究成果により、金属粒界相を適切に選択し、組織形態を制御することにより、金属/ $Mg_2Si$  コンポジット試料の  $PF$  と  $zT$  を両方向上できることが明らかになった。また、(4)の研究成果は、コンポジット化するうえで、母相の結晶構造を詳細に調査する必要があることを示すものである。本研究が世界に先駆けて明らかにした、金属粒界相導入による熱電性能向上に関する知見は、他の熱電材料にも適用できることから、高効率コンポジット熱電材料の開発とそれを用いた熱電発電の普及に大きく貢献するものと期待される。

#### < 引用文献 >

- V. K. Zaitsev et al., Highly effective  $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$  thermoelectrics, *Phys. Rev. B*, 74, 2006, 045207.
- Ning et al., Enhanced thermoelectric performance of porous magnesium tin silicide prepared using pressure-less spark plasma sintering, *J. Mater. Chem. A*, 3, 2015, 17426-17432.
- M. Kubouchi et al., Quantitative analysis of interstitial Mg in  $Mg_2Si$  studied by single crystal X-ray diffraction, *J. Alloys Compd.*, 617, 2014, 389-392.
- M. Kubouchi et al., Effect of Interstitial Mg in  $Mg_{2+x}Si$  on Electrical Conductivity and Seebeck Coefficient, *J. Electr. Mater.* 45, 2016, 1589-1593.
- Y. Hayashibara et al., Fabrication and Thermoelectric Properties of Al/ $Mg_2Si$  Composite Materials, *Mater. Trans.*, 59, 2018, 1041-1045.
- M. Kubouchi et al., Electronic structure and thermoelectric properties of boron doped  $Mg_2Si$ , *Scr. Mater.*, 123, 2016, 59-63.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Saito Wataru, Hayashi Kei, Dong Jinfeng, Li Jing-Feng, Miyazaki Yuzuru	4. 巻 10
2. 論文標題 Control of the Thermoelectric Properties of Mg <sub>2</sub> Sn Single Crystals via Point-Defect Engineering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2020
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-58998-1	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 該当する
1. 著者名 Hayashi Kei, Saito Wataru, Sugimoto Kazuya, Ohoyama Kenji, Hayashi Kouichi, Happo Naohisa, Harada Masahide, Oikawa Kenichi, Inamura Yasuhiro, Miyazaki Yuzuru	4. 巻 10
2. 論文標題 Preparation, thermoelectric properties, and crystal structure of boron-doped Mg <sub>2</sub> Si single crystals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035115 ~ 035115
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5143839	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 Li Hezhang, Hayashi Kei, Dong Jinfeng, Li Jing-Feng, Miyazaki Yuzuru	4. 巻 7
2. 論文標題 Distinct impact of order degree on thermoelectric power factor of p-type full-Heusler Mn <sub>2</sub> VAl compounds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Research Express	6. 最初と最後の頁 055503 ~ 055503
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2053-1591/ab875b	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 該当する
1. 著者名 Nakasawa Hayato, Hayashi Kei, Takamatsu Tomohisa, Miyazaki Yuzuru	4. 巻 126
2. 論文標題 Lattice dynamics and lattice thermal conductivity of CrSi <sub>2</sub> calculated from first principles and the phonon Boltzmann transport equation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 025105 ~ 025105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5096458	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 Hayashibara Yuta, Hayashi Kei, Ando Ikumi, Kubouchi Masataka, Ogawa Yohei, Saito Wataru, Miyazaki Yuzuru	4. 巻 59
2. 論文標題 Fabrication and Thermoelectric Properties of Al/Mg <sub>2</sub> Si Composite Materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1041 ~ 1045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.E-M2018815	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 Hayashi Kei, Kubouchi Masataka	4. 巻 56
2. 論文標題 Crystal Structure and Thermoelectric Properties of Magnesium Silicide	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materia Japan	6. 最初と最後の頁 546 ~ 553
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.56.546	査読の有無 無
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29件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 S. Yoshioka, K. Hayashi, Y. Miyazaki
2. 発表標題 Crystal structure evolution of Zn <sub>4</sub> Sb <sub>3</sub> during melt grown process
3. 学会等名 38th International and 4th Asian Conference on Thermoelectrics (ICT & ACT 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 W. Saito, K. Hayashi, Y. Miyazaki
2. 発表標題 Investigation on lattice defects in Mg <sub>2</sub> Sn single crystals prepared under different Ar partial pressure
3. 学会等名 38th International and 4th Asian Conference on Thermoelectrics (ICT & ACT 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 D. Fukutome, T. Takamatsu, K. Hayashi, Y. Miyazaki
2 . 発表標題 Thermoelectric Properties of Strontium Titanium Oxyhydrides
3 . 学会等名 38th International and 4th Asian Conference on Thermoelectrics (ICT & ACT 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Hayashi, W. Saito, Y. Miyazaki, K. Sugimoto, S. Uechi, Y. Kanazawa, Y. Fukumoto, T. Yamamoto, K. Ohyama, K. Hayashi, N. Happo, M. Harada, K. Oikawa, Y. Inamura
2 . 発表標題 Thermoelectric properties and local structure of B doped Mg <sub>2</sub> Si single crystal
3 . 学会等名 38th International and 4th Asian Conference on Thermoelectrics (ICT & ACT 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Li, K. Hayashi, Y. Miyazaki
2 . 発表標題 Preparation and Thermoelectric Properties of Mn <sub>2</sub> VAl Full Heusler Alloys with Different Order Degree
3 . 学会等名 38th International and 4th Asian Conference on Thermoelectrics (ICT & ACT 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Ishii, H. Sugawara, M. Tokuda, H. Sato, T. Hanajiri, H. Shimoshige, S. Kurosu, K. Hayashi, I. Ando, W. Saito, and Y. Miyazaki
2 . 発表標題 Cross-sectional characterization of Mg <sub>2</sub> Si-Ni interface compacted by SPS method at 800 °C
3 . 学会等名 5th Asia-Pacific conference on semiconducting silicides and related materials (APAC-SILICIDE 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤啓介, 高松智寿, 林慶, 宮崎讓
2. 発表標題 C40型(Mn,Cr)(Si,Al)2系化合物における熱電特性の組成および合成条件依存性
3. 学会等名 第16回日本熱電学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 亘, 林 慶, 宮崎 讓
2. 発表標題 Mg空孔欠陥を含むMg2Sn単結晶の熱電性能と微細組織
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Hayashi, Wataru Saito, Yuzuru Miyazaki, Kazuya Sugimoto, Syouichi Uechi, Yuki Kanazawa, Yohei Fukumoto, Takayoshi Yamamoto, Kenji Ohoyama, Kouichi Hayashi, Naohisa Happo, Masahide Harada, Kenichi Oikawa, Yasuhiro Inamura
2. 発表標題 Thermoelectric Properties and Local Structure of Boron-Doped Mg2Si and Mg2Sn
3. 学会等名 14th International Conference on the Structure of Non-Crystalline Materials (NCM14) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李和章, 林 慶, 宮崎 讓
2. 発表標題 Mn2VAIフルホイスラー合金の熱電特性と規則度の関係
3. 学会等名 第74回応用物理学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Z. Huang, W. Saito, K. Hayashi, Y. Miyazaki
2. 発表標題 Thermoelectric Properties of Melt-Grown Mg <sub>2</sub> Sn <sub>1-x</sub> Gax Ingots
3. 学会等名 第74回応用物理学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉岡 駿, 林 慶, 宮崎 讓
2. 発表標題 溶融合成したZn <sub>4</sub> Sb <sub>3</sub> におけるクラック生成機構
3. 学会等名 第74回応用物理学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永島良美, 李和章, 林 慶, 宮崎 讓
2. 発表標題 スピンギャップレス半導体Mn <sub>2</sub> CoAlの熱電性能
3. 学会等名 第74回応用物理学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Miyazaki, H. Nagai, W. Saito, K. Hayashi
2. 発表標題 Understanding Detailed Crystal Structures to Further Improve Thermoelectric Properties of Silicide-based Materials
3. 学会等名 17th European Conference on Thermoelectrics (ECT2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 亘, 林 慶, 黄志成, 宮崎 讓
2. 発表標題 Mg空孔欠陥の導入によるMg <sub>2</sub> Si <sub>2-x</sub> Sbx単結晶の熱電性能向上
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 I. Ando, K. Hayashi, W. Saito, Y. Hayashibara, Y. Miyazaki
2. 発表標題 Measurements of surface potential of M/Mg <sub>2</sub> Si (M = Mg, Al, Ni) interfaces
3. 学会等名 37th International and 16th European Conference on Thermoelectrics (ICT & ECT 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤亘, 林慶, 宮崎讓
2. 発表標題 Mg <sub>2</sub> Snの伝導型と結晶構造に対する格子欠陥の効果
3. 学会等名 第15回日本熱電学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉本和哉, 上地昇一, 金澤雄輝, 福本陽平, 山本隆文, 大山研司, 林好一, 八方直久, 原田正英, 及川健一, 稲村康弘, 林慶, 齋藤亘, 宮崎讓
2. 発表標題 白色中性子ホログラフィーによる熱電材料BドーブMg <sub>2</sub> Siの研究
3. 学会等名 第8回3D活性サイト科学成果報告会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林慶, 齋藤亘, 宮崎讓, 杉本和哉, 上地昇一, 金澤雄輝, 福本陽平, 山本隆文, 大山研司, 林好一, 八方直久, 原田正英, 及川健一, 稲村康弘
2. 発表標題 マグネシウムシリサイド熱電材料における活性サイトの研究
3. 学会等名 第8回3D活性サイト科学成果報告会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉本和哉, 上地昇一, 金澤雄輝, 福本陽平, 山本隆文, 大山研司, 林好一, 八方直久, 原田正英, 及川健一, 稲村康弘, 林慶, 齋藤亘, 宮崎讓
2. 発表標題 白色中性子ホログラフィーによる熱電材料BドーブMg <sub>2</sub> Siの研究
3. 学会等名 日本中性子科学会 第18回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤亘, 林慶, 宮崎讓
2. 発表標題 Mg <sub>2</sub> Snの結晶構造と伝導型に関する研究
3. 学会等名 応用物理学会東北支部 第73回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sugimoto, S. Uechi, Y. Kanazawa, Y. Fukumoto, T. Yamamoto, K. Ohoyama, K. Hayashi, N. Happo, M. Harada, K. Oikawa, Y. Inamura, K. Hayashi, W. Saito, Y. Miyazaki
2. 発表標題 Determination of dopant position of thermoelectric material B-doped Mg <sub>2</sub> Si by white neutron holography
3. 学会等名 ISSP - J-PARC Joint Workshop on Science Frontier by Neutron Scattering ~ The 17th Korea-Japan meeting on Neutron Science ~ (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本和哉, 上地昇一, 金澤雄輝, 本陽平, 山本隆文, 大山研司, 林好一, 八方直久, 原田正英, 及川健一, 稲村康弘, 林慶, 齋藤亘, 宮崎讓
2. 発表標題 白色中性子ホログラフィーによる熱電材料BドーブMg <sub>2</sub> Siの研究
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 亘, 林 慶, 宮崎 讓
2. 発表標題 単結晶作製時の圧力変化によるMg <sub>2</sub> Snの格子欠陥制御
3. 学会等名 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 K. Hayashi
2. 発表標題 Microstructure and thermoelectric properties of metal / magnesium silicide composite materials
3. 学会等名 Advanced Composite Materials Congress 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Hayashi
2. 発表標題 Microstructure and thermoelectric properties of magnesium silicide composites
3. 学会等名 World Congress of Smart Materials 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安藤 郁美, 林 慶, 齋藤 亘, 林原 佑太, 宮崎 讓
2. 発表標題 Mg <sub>2</sub> Si/M (M = Mg, Al, Ni)界面の表面電位測定
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安藤郁美, 林 慶, 齋藤 亘, 林原佑太, 宮崎 讓
2. 発表標題 Mg <sub>2</sub> Si/M (M=Mg, Al, Ni)界面の表面電位測定
3. 学会等名 応用物理学会東北支部 第72回学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Kubouchi, K. Hayashi, Y. Ogawa, W. Saito, Y. Miyazaki, and R. Funahashi
2. 発表標題 Analysis of point defects in Mg-Si-Sn ternary thermoelectric compounds
3. 学会等名 The 15th International Conference on Advanced Materials IUMRS-ICAM 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017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 分担者	宮崎 讓  (MIYAZAKI Yuzuru)  (40261606)	東北大学・工学研究科・教授    (11301)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	安藤 郁美  (ANDO Ikumi)		
研究協力者	林原 佑太  (HAYASHIBARA Yuta)		
研究協力者	齋藤 巨  (SAITO Wataru)		
研究協力者	李 和章  (LI Hezhang)		