

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03421

研究課題名（和文）電子構造・フォノン分散の精密制御に基づく環境調和型熱電材料の創製

研究課題名（英文）Development of environmentally friendly thermoelectric materials based on control of electronic structure and phonon dispersion

研究代表者

高際 良樹 (TAKAGIWA, YOSHIKI)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・エネルギー・環境材料研究拠点・独立研究者

研究者番号：90549594

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000 円

研究成果の概要（和文）：近年、超スマート社会の実現・加速に向けて、多数のセンサーの駆動を支えるメンテナンスフリーの自立電源の確保が求められている。本研究課題の成果は、希少元素かつ毒性元素を含むビスマス-テルル系熱電材料を代替する材料候補を発見したことであり、鉄・アルミニウム・シリコンからなる三元系化合物である。その特徴は、原料材料の資源性に優れ、コストを大幅に削減できること、他元素ドーピングを必要とせず、同一合金系でp/n制御が可能なこと、化学的・熱的な安定性に優れ、酸化による特性劣化の影響が小さいこと、が挙げられる。これらの3つの特徴は、量産化可能な熱電発電モジュールの設計・普及に際して有利に働く。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱電発電技術を普及させるためには、コスト・安全性の観点から、ビスマス-テルル系既存材料を代替する新材料が必要である。150 以下の低温排熱を利用するモジュールの普及が進めば、IoT社会における独立電源としての一翼を担うことが出来る。そのためには今後は、材料の資源性および生産コストも考慮されるであろう。このような観点から、地殻中に含まれる元素で第1位の酸素を除く上位3つの元素である鉄（第4位）・アルミニウム（第3位）・シリコン（第2位）のみから構成されるFAST材料は、既存材料を代替する材料として大きな可能性を秘めている。特に、安全・安価な材料として供給できる点に大きな社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Recently, a large number of sensors are required to support an Internet of Things society, and it is necessary to develop an independent power supply to drive IoT devices. The current research achievement of this project was the discovery of a ternary compound composed of iron, aluminum, and silicon. The novel features of FAST materials are (1) consisting of low-cost and non-toxic raw materials of Fe, Al, and Si; (2) controlling p/n characteristics with the same alloy system without chemical doping by other elements; (3) possessing excellent chemical and thermal stabilities, together with good oxidation resistance. These three characteristics surpass conventional thermoelectric materials when designing power generation modules.

研究分野：材料物性

キーワード：熱電変換材料 バンド計算 フォノン計算 キャリアドーピング コンビナトリアル手法

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、超スマート社会の実現に向けて多種多様なセンサーが数多く必要とされている中で、IoT機器の駆動を支える自立電源の確保が求められている。現状、各種センサー用電源としてはボタン電池が主流となっているが、ボタン電池の交換コストやリサイクル性を考えると、メンテナンスフリーの代替電源の確保が課題である。その中で、太陽電池は既に自立電源としての普及が進んでおり、導入事例も多い。一方、我々の周りには未活用熱源が多数存在し、その大部分は150°C以下の低温排熱である。この温度域の排熱を有効に活用することが出来れば、未利用エネルギーの高効率利用に貢献できる。また、室温近傍の微小温度差環境で各種センサーの駆動を可能とする自立電源システムが構築されれば、冷却分野でのペルチェモジュールに加えて、発電分野における市場開拓に大きく貢献することに繋がる。

本研究課題は、社会実装に資する低コストかつ無害の新規熱電変換材料の開発を行い、僅かな温度差環境でもセンサー駆動に必要な電力を確保できる電源技術の基盤構築を目指す。必要とされる材料特性は、内部抵抗を低減するために電気抵抗率が小さく、高い電圧を得るためにゼーベック係数が大きい必要があり、かつ、モジュールのダウンサイズや軽量化のために低い熱伝導率を兼備しなければならない。

2. 研究の目的

ビスマス-テルル系既存材料の代替になり得る環境調和型熱電変換材料の創製に向けて、本研究では以下の課題に取り組んだ。

- (1) 第一原理計算を用いて、フェルミ準位近傍に狭ギャップを形成し、有効質量の大きなバンドと小さなバンドから構成される新材料を探索
- (2) 組成傾斜したバルクおよび薄膜試料を作製し、熱電物性のマッピングによる最適組成を決定

熱電発電の普及を促進するためには、材料のコスト・資源性の観点から、ビスマス-テルル系既存材料を代替する新材料が求められている。未利用排熱のうち、半数程度が150°C以下の低温域であり、この温度域での排熱を利用するモジュールの普及が進めば、高度情報化社会における独立電源としての一翼を担うことが出来る。しかし、実用化されたビスマス-テルル系材料 ($zT = 1.0$) を性能面で上回る材料は、その発見から50年以上を経た今でも限られている。これまでは社会実装のために必要なことは材料の性能面であることが強調されてきたが、今後は材料の資源性および生産コストも考慮されるであろう。

3. 研究の方法

熱電変換材料の評価指標として、無次元性能指数 $zT = S^2\sigma T/\kappa$ が用いられている。 S はゼーベック係数、 σ は電気伝導率、 κ は熱伝導率、 T は温度である。分子の $S^2\sigma$ は電気出力因子である。 $S^2\sigma$ はモジュールの出力に直接関連する因子であり、 $\text{mW}/\text{m}\cdot\text{K}^2$ オーダー以上の値が必要とされる。一方、 κ はできるだけ低い値が望まれるが、 S 、 σ および κ の電子成分は、キャリア濃度に依存するため、独立に制御することができない。 S 、 σ は、状態密度・群速度・緩和時間に依存し、 κ の格子成分は、フォノンの群速度・緩和時間に依存することから、大きな $S^2\sigma$ が得られる電子構造の条件を見出し、格子熱伝導率を低減するための指針を構築することが、性能向上には欠かせない。

本研究課題は、第一原理計算を活用して電子構造・フォノン分散の精密制御により150°C以下の熱源を用いて μW オーダー以上の出力を有する、ビスマス-テルル系既存材料を代替する新規熱電変換材料を創製すること。特に、社会実装を視野に入れた環境調和型熱電変換材料の創製に向けて、アルミニウム系金属間化合物を基軸としたバルク・薄膜材料の創製、機能制御を行う。

■ 第一原理計算を用いた新材料探索

第一原理計算を用いて、熱電材料として最適な電子構造を有する材料のスクリーニングを行った。材料探索の過程で重要なことは選択する元素系である。本研究では、地殻に含まれる元素で第一位である酸素を除く上位3つの元素である、鉄(第四位)、アルミニウム(第三位)、シリコン(第二位)から構成されるFe-Al-Si三元系での新規材料の探索・合成・熱電物性評価に注力した。

■ 組成傾斜したバルクおよび薄膜試料の作製と評価

第一原理計算を用いてスクリーニングを行った新規Fe-Al-Si 3元系熱電材料は、組成・結晶構造・配向の変化により、大幅に性能が変化することが判明し、それゆえに、第一原理計算では物性の正確な予測が困難であるという点も明らかになった。一方で、大幅な発電特性の向上の余地が残されていると言える。発電特性の向上のためには、組成・結晶構造・配向を精密に制御して、それぞれを正確に変化させながら効率良く材料を作製評価するバルクおよび薄膜作製プロセスの確立が必要である。具体的には、Al:Fe:Si = 2:3:3の化学量論組成を中心として、材料組成を徐々に変化させ、結晶構造・配向も徐々に変化させられる技術の構築が、高性能材料の早期発見には欠かせない。

熱電特性を最適化するためには、存在組成範囲内で連続的に特性を測定するのが理想的である。このため、まず存在組成範囲を明らかにする必要がある。そこで、複相試料を長時間アニー

ルする方法およびマルチプル拡散法を用いて、状態図の存在組成範囲およびタイラインの情報を得た。また、一方向凝固法およびボールミルを利用した方法により、それぞれ不純物相の割合が少ない τ_1 相試料の作製と組成制御を試みた。また、組成傾斜試料を作製し、試料中での化学組成と熱電特性をともに試料内における位置の関数として測定すれば、熱電特性と化学組成の関連を知ることができる。そこで、一方向凝固法及び拡散対法によりそれぞれ組成傾斜試料を作製し、熱電特性を評価した。

一方、薄膜作製時に課題となるのは、強磁性体である Fe を含むことにある。市販の強磁性体対応型のスパッタカソードは、Fe のスパッタレートが極めて低く、Fe-Al-Si 3 元系熱電材料の薄膜特性制御には不十分な性能であった。また、発電特性の向上には、それぞれが相関を有する σ 、 S 、 κ を独立して制御する材料設計が必要となる。このためには、材料のナノ構造化が有効である。これらの課題を克服し、社会実装に資する低コストかつ無害の新規薄膜熱電材料の作製に向けた基盤技術の構築を目指した。組成を変化させた Fe-Al-Si 3 元系薄膜熱電材料、ならびに、Fe/FeSi 超格子材料の作製には、NIMS が有する既存のコンビナトリアルスパッタコーティングシステムを用いた。また、Fe 専用のマグネトロンスパッタカソードを独自に開発し、薄膜試料合成実験に使用した。

4. 研究成果

本研究期間内において、主に下記の成果が得られた。

本研究課題の成果として、ビスマスーテルル系既存材料を代替する材料候補として、鉄・アルミニウム・シリコンからなる三元系化合物の発見 (**Fe-Al-Si Thermoelectric Material, FAST 材料**[国際特許出願: PCT/JP2018/032031, 商標登録: FAST.Energy, 商願 2019-143840]) が挙げられる。その特徴は、①原料材料の資源性に優れ、コストを大幅に削減できること、②他元素ドーピングを必要とせず、同一合金系で p/n 制御が可能なこと[1]、③化学的・熱的な安定性に優れ、酸化による特性劣化の影響が小さいこと、が挙げられる[2]。これらの代表的な3つの特徴は、発電モジュールの設計・普及に際して、現行の材料系を凌駕する。

キャリア濃度調整やバンド縮重を利用した物性制御により、ビスマスーテルル系既存材料を代替する高い電気出力因子を有する FAST 材料の創製が可能になる。このことにより、発電分野の社会実装に向けて、鉄-アルミニウム-シリコン系金属間化合物を基軸とした新たなブレイクスルーの創出につながる。

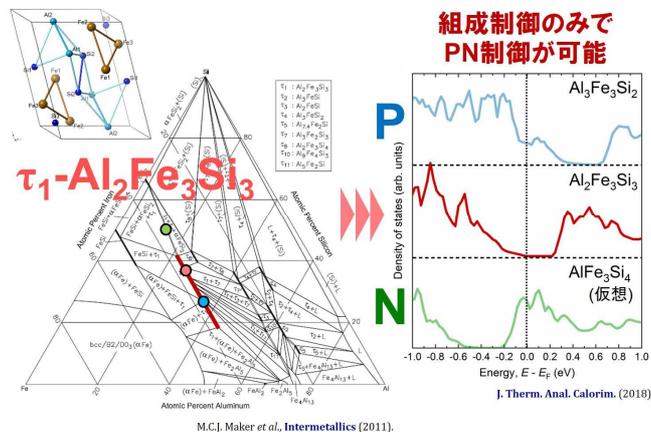


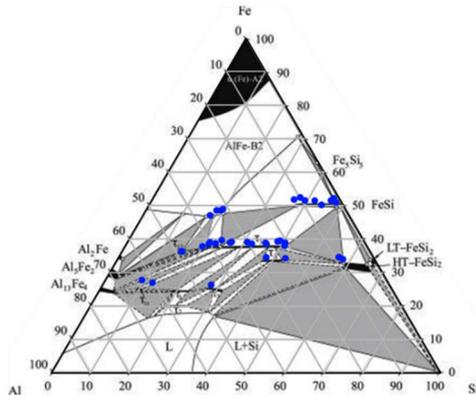
図 1 Fe-Al-Si 三元系における材料探索 (左) 状態図 [3]と (右) 電子構造計算結果 [4]

図 1 に示すように、FAST 材料を構成する τ_1 -Al₂Fe₃Si₃ 相の電子構造はフェルミ準位近傍に 0.2 eV 程度のバンドギャップを形成し、半導体的特性を示す。また、 τ_1 相の生成組成域は広いために、Al-rich 側の組成(Al₃Fe₃Si₂)では p 型試料、Si-rich 側の仮想組成(AlFe₃Si₄)では n 型試料を合成することができる。実際に、実験により Al/Si 比の調整のみで p 型・n 型材料の作り分けが可能であることを明らかにした。同一合金にて p/n 制御できることは、発電モジュール作成の際に、素子間の熱膨張係数の不一致を避けられる点で、モジュールの信頼性向上に寄与する。

・ Al-Fe-Si 3 元系熱電バルク材料の組成制御

τ_1 相とそれと隣接する相の 2 相あるいは 3 相で構成される試料を作製し、長時間アニールし、 τ_1 相の化学組成を測定することにより、 τ_1 相の 900°C における存在組成範囲を測定した結果を図 2 に示す。つづいて、開発中のマルチプル拡散法によりタイラインの情報を含めて全体を把握した (図 2 (b))。その結果、 τ_1 相の存在組成範囲は報告されている範囲と概ね同じであることを確認した。既存の状態図との違いとしては、 τ_1 相の隣接相である τ_{11} 相の存在組成範囲が、報告値にくらべ鉄とシリコンがリッチな方向にずれていることが挙げられる。

(a)



(b)

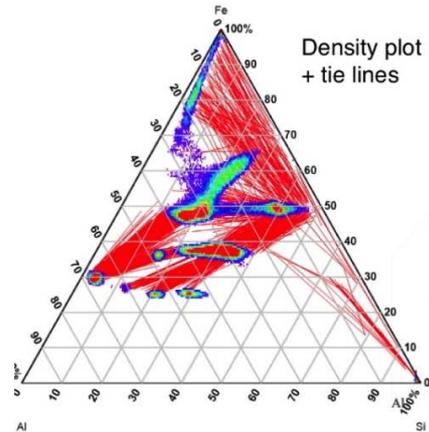


図2 (a) 複相試料を長時間アニールする方法で測定した τ_1 相周囲の相境界組成 (青丸) 及び(b) マルチプル拡散法で決定した Fe-Al-Si 系における相の存在範囲とタイライン

図3に一方向凝固法(ブリッジマン法)により作製した試料中の組織および化学組成の分布を示す。凝固は図の左端から始まり右方向へ進んでいる。左端に初晶として ϵ -FeSi 相が見られる。次に τ_1 相、つづいて τ_3 相のそれぞれ単相領域が現れており、 τ_1 相、 τ_3 相が包晶反応により形成されることが分かる。この試料中の化学組成を図3中の下部に示す。一方向凝固では仕込み組成を変化させることにより、生成する τ_1 相の化学組成を制御できることを確認した。一方向凝固により作製した試料におけるゼーベック係数の分布を測定した結果を図4に示す。相によるゼーベック係数の違いが顕著にあらわれている。 τ_1 相内においては、相内の化学組成の変化が小さいことを反映しゼーベック係数の変化は小さい。

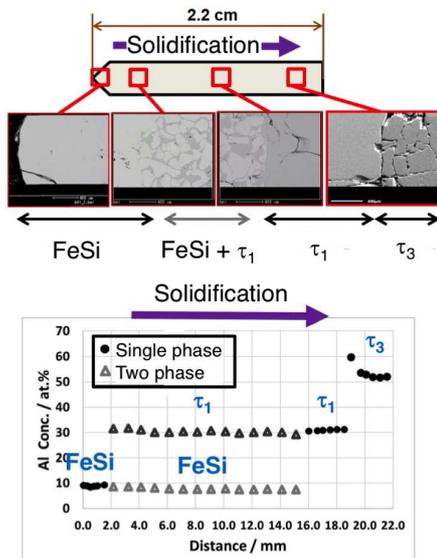


図3 ブリッジマン法で作製した Fe-Al-Si 試料と試料内の組成分布

熱電特性の τ_1 相内の化学組成依存性を明らかにするため、 $\text{Al}_{21.5}\text{Fe}_{37}\text{Si}_{41.5}/\text{Al}_{41.5}\text{Fe}_{37}\text{Si}_{21.5}$ の拡散対を作製、相互拡散により組成傾斜を生じさせ、化学組成および熱電特性(ゼーベック係数、熱浸透率)を位置の関数として測定した(図5)。この結果、ゼーベック係数は Al 濃度が低いと n 型、高いと p 型を示し、Al 濃度の上昇に伴い 23.5 at.% 付近で n 型から p 型へと遷移する。n 型、p 型の状態において、ゼーベック係数は 23 at.% Al、24 at.% Al 付近で絶対値が最も大きく、それぞれ $-130 \mu\text{VK}^{-1}$ 、 $70 \mu\text{VK}^{-1}$ 程度の値を示した。

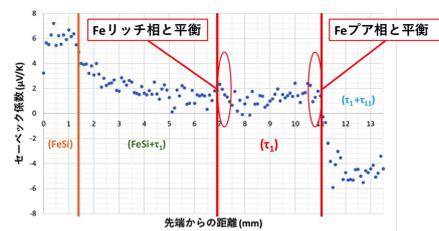


図4 ブリッジマン法で作製した試料中のゼーベック係数(位置の関数として測定)

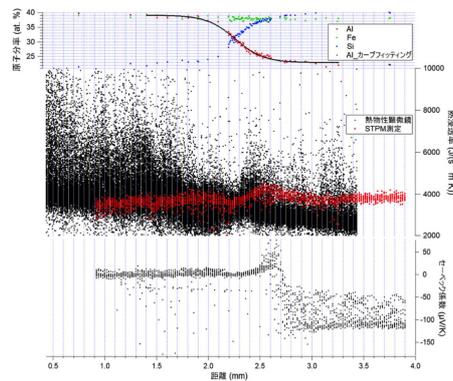


図5 $\text{Al}_{21.5}\text{Fe}_{37}\text{Si}_{41.5}/\text{Al}_{41.5}\text{Fe}_{37}\text{Si}_{21.5}$ の拡散対中の組成分布、熱浸透率、ゼーベック係数の測定結果(位置の関数として測定)

・ Al-Fe-Si 3 元系熱電薄膜材料の組成制御

Fe のスパッタレートを大幅に増大させ、かつ、組成制御性の向上を図る目的で、新規に独自設計のマグネトロンスパッタカソードの作製を行なった。マグネットの強度・個数を増加すると共に、磁場の外部漏れ出しを抑制し、磁性体のスパッタ効率・制御性の大幅な向上を図るものである。

このカソードを用いて作製した Fe-Al-Si 3 元系熱電薄膜材料、組成制御例を図 6 に示す。組成は、EDX により評価した。スパッタカソードに印加する電力の制御により、様々な組成に制御可能であることがわかる。サンプル 2 では、 $Al_2Fe_3Si_3$ の組成が達成されている。図 7 は、それら組成が異なる薄膜サンプルの電気伝導率の測定値である。Fe に対する Si、Al の含有量によって、大幅に電気伝導特性が変化することがわかる。

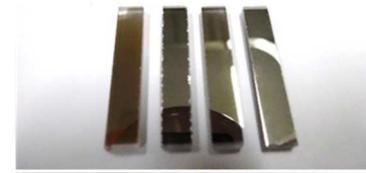
当該、コンビナトリアルスパッタ材料創製技術により、Fe などの磁性材料を含む熱電薄膜材料の組成制御を全自動で行える研究基盤の構築を行った。

・ Fe/FeSi 超格子材料

Fe と FeSi との超格子材料を各層の厚さを変化させて作製し、そのパワーファクター (PF) の評価を行った。膜厚は、全て 200 nm とした。Fe/FeSi の各層膜厚と積層数は、1.2 nm × 83 ペア、1.0 nm × 100 ペア、0.8 nm × 125 ペア、0.6 nm × 167 ペアとして、サンプル作製を行った。これらサンプルの PF の変化を図 8 に示す。全てのサンプルは温度の上昇に伴って PF が向上することがわかった。層厚を薄くするにつれ、PF が大幅に向上する。また、1.0 nm 以下の層厚では、急激に PF の向上がみられると共に、層厚 1.2 nm では、1023K 以上で PF が減少に変化するのに対して、上昇傾向がより急峻となることが明らかとなった。今後は、このナノ構造特有の性質を活用して薄膜材料の熱電特性の向上を目指す。

【参考文献】

[1] Y. Takagiwa, Y. Isoda, M. Goto, and Y. Shinohara, *J. Phys. Chem. Solids* **118**, 95 (2018).
 [2] Y. Takagiwa and Y. Shinohara, *Scripta Mater.* **172**, 98 (2019). [Viewpoint article]
 [3] V. Raghavan, *J. Phase Equilibria Diffusion* **30**, 184 (2009).
 [4] Y. Takagiwa, Y. Isoda, M. Goto, and Y. Shinohara, *J. Therm. Anal. Calorim.* **131**, 281 (2018).



	Sample1	Sample2	Sample3	Sample4
Fe	120W	120W	120W	120W
x	3	3	3	3
Si	18W	18W	11W	25W
y	3	3	1.8	4.2
Al	0W	10W	6W	14W
z	0	2	2.8	1.2

図 6 Fe-Al-Si 系熱電薄膜材料の組成制御例

Sample 1	1.741x10 ⁴ S/cm	40 nm
Sample 2	4.320x10 ³ S/cm	30 nm
Sample 3	6.564x10 ³ S/cm	30 nm
Sample 4	2.968x10 ³ S/cm	40 nm

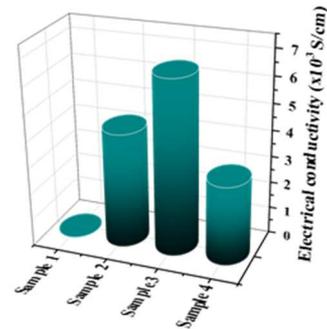


図 7 異なる組成の Fe-Al-Si 系熱電薄膜材料の電気伝導特性

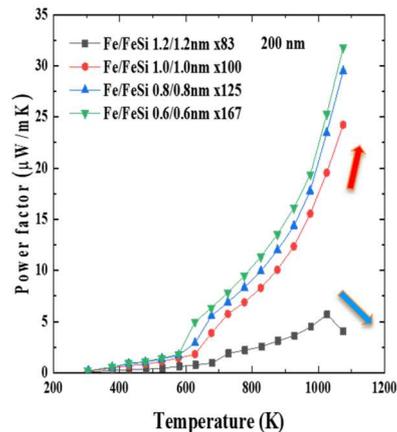


図 8 Fe/FeSi 超格子材料の電気出力因子の層厚依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Y. Takagiwa	4. 巻 59
2. 論文標題 Improvement of the Thermoelectric Performance of Pseudogap and Narrow-gap Compounds via Theoretical Calculation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 1411-1416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.E-M2018829	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 Y. Takagiwa, Y. Isoda, M. Goto, and Y. Shinohara	4. 巻 131
2. 論文標題 Electronic structure and thermoelectric properties of narrow-band-gap intermetallic compound Al ₂ Fe ₃ Si ₃	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Analysis and Calorimetry	6. 最初と最後の頁 281-287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10973-017-6621-9	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 Y. Takagiwa, Y. Isoda, M. Goto, and Y. Shinohara	4. 巻 118
2. 論文標題 Conduction type control and power factor enhancement of the Al ₂ Fe ₃ Si ₃ thermoelectric material	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics and Chemistry of Solids	6. 最初と最後の頁 95-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpcs.2018.03.003	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 高際良樹	4. 巻 14
2. 論文標題 理論計算を併用した擬ギャップ系・狭ギャップ系材料の熱電性能向上	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本熱電学会誌	6. 最初と最後の頁 120-125
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 -

1. 著者名 Z. Hou, Y. Takagiwa, Y. Shinohara, Y. Xu, and K. Tsuda	4. 巻 11
2. 論文標題 Machine-Learning-Assisted Development and Theoretical Consideration for the Al ₂ Fe ₃ Si ₃ Thermoelectric Material	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 11545-11554
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b02381	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 Y. Takagiwa and Y. Shinohara	4. 巻 172
2. 論文標題 A practical appraisal of thermoelectric materials for use in an autonomous power supply	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 98-104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2019.07.022	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 高際良樹	4. 巻 39
2. 論文標題 希少元素が不要な熱電材料の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 機能材料	6. 最初と最後の頁 42-48
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 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 -

1. 著者名 高際良樹, Zhufeng Hou, 篠原嘉一, 徐一斌, 津田宏治	4. 巻 28
2. 論文標題 機械学習を用いた環境調和型熱電材料の出力向上	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 クリーンエネルギー	6. 最初と最後の頁 11-15
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 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 -

1. 著者名 高際良樹, 池田輝之, 小島宏康	4. 巻 29
2. 論文標題 汎用元素のみで構成する熱電発電モジュールの開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 クリーンエネルギー	6. 最初と最後の頁 13-19
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 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 -

1. 著者名 高際良樹	4. 巻 -
2. 論文標題 計算科学・実験・機械学習を用いたIoT機器駆動用新規熱電材料の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 次世代熱電変換材料・モジュールの開発シーエムシー出(シーエムシー出版)	6. 最初と最後の頁 181-187
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 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 -

1. 著者名 池田輝之, 池田亜矢子	4. 巻 -
2. 論文標題 バルク熱電材料のハイスループットな研究手法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 次世代熱電変換材料・モジュールの開発シーエムシー出(シーエムシー出版)	6. 最初と最後の頁 277-288
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 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 -

1. 著者名 後藤真宏	4. 巻 -
2. 論文標題 熱電材料のハイスループットスパッタ合成と評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 次世代熱電変換材料・モジュールの開発シーエムシー出(シーエムシー出版)	6. 最初と最後の頁 289-304
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 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33件（うち招待講演 12件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Y. Takagiwa, Y. Isoda, M. Goto, Y. Shinohara, A. Saitoh, and T. Ikeda
2. 発表標題 Development of Low-cost and Non-toxic Thermoelectric Material for Sensor Application
3. 学会等名 15th International Symposium on Functionally Graded Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Saitoh, H. Nishimine, A. Ikeda, Y. Takagiwa, T. Nishi, H. Ohta, and T. Ikeda
2. 発表標題 An efficient way of exploring microstructure and thermoelectric properties of multicomponent systems using composition-graded bulk materials
3. 学会等名 15th International Symposium on Functionally Graded Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高際良樹, 磯田幸宏, 後藤真宏, 篠原嘉一, Zhufeng Hou, 徐一斌, 津田宏治
2. 発表標題 実験・計算科学・機械学習の協働による新規熱電材料開発
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 西峯広智, 池田輝之
2. 発表標題 ブリッジマン法を用いた組成傾斜試料の作製と新規熱電材料の探索
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高際良樹, 磯田幸宏, 後藤真宏, 篠原嘉一, Zhufeng Hou, 徐一斌, 津田宏治
2. 発表標題 IoTデバイス用自立電源に向けたAl-Fe-Si系熱電材料の基礎研究: 実験・計算科学・機械学習の協働
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Takagiwa, Y. Isoda, M. Goto, Y. Shinohara, Z. Hou, Y. Xu, and K. Tsuda
2. 発表標題 Development of Low-cost and Non-toxic Al ₂ Fe ₃ Si ₃ Thermoelectric Material: Experiment, Theoretical Calculation, and Machine Learning Prediction
3. 学会等名 MRS Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高際良樹
2. 発表標題 NIMSにおけるユビキタス系熱電素子の開発: 現状とこれから
3. 学会等名 平成30年度物質科学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田輝之
2. 発表標題 高効率熱電変換材料の研究動向-材料中の構造に着目して
3. 学会等名 平成30年度物質科学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青木優太, 齋藤明子, 池田輝之, 高際良樹
2. 発表標題 Al-Fe-Si系平衡状態図におけるAl ₂ Fe ₃ Si ₃ 相の存在組成範囲の決定
3. 学会等名 日本金属学会2019年春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 B. Alinejad, 山本悠真, 高際良樹, 池田輝之
2. 発表標題 Solid state reaction modification to enhance nanostructured Mg ₂ Si thermoelectric properties via activated reactive consolidation
3. 学会等名 日本金属学会2019年春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高際良樹
2. 発表標題 実験と計算科学を組み合わせた新規熱電変換材料創製のための基礎研究
3. 学会等名 日本熱電学会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齋藤明子, 青野美南, 西峯広智, 池田輝之, 高際良樹, 長谷川靖洋
2. 発表標題 新規熱電変換材料の開発における一方向凝固法の有効性
3. 学会等名 日本熱電学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齋藤明子, 西峯広智, 池田亜矢子, 池田輝之, 高際良樹
2. 発表標題 一方向凝固を利用した熱電材料の組織探索
3. 学会等名 日本金属学会春期講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Takagiwa
2. 発表標題 Development of Low-cost and Non-toxic Thermoelectric Materials and Devices for Sensor Application
3. 学会等名 The 8th WMRIIF Symposium and General Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Takagiwa
2. 発表標題 Development of Low-cost and Non-toxic Thermoelectric Materials and Devices for Sensor Applications
3. 学会等名 2019 North American Thermoelectric Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤真宏
2. 発表標題 マテリアルズインフォマティクスに基づく物質合成
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤真宏, 徐一斌
2. 発表標題 コンビナトリアルスパッタ法を用いた伝熱・熱電材料開発 - ナノ伝熱制御からデバイス創製まで -
3. 学会等名 第14回日本熱電学会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高際良樹, 池田輝之, 小島宏康
2. 発表標題 IoTセンサ用自立電源に向けたAl-Fe-Si系熱電材料の創製とモジュール開発
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 B. Alinejad, Y. Yamamoto, Y. Takagiwa, T. Ikeda
2. 発表標題 Microstructure tailoring of Al ₂ Fe ₃ Si ₃ for thermoelectric applications
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 西峯広智, 齊藤明子, 池田輝之, 高際良樹
2. 発表標題 Al-Fe-Si系熱電材料の単相測定
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木優太, 松井裕貴, 池田亜矢子, 池田輝之
2. 発表標題 Al-Fe-Si系材料におけるマルチプル拡散法の有効性と状態図の作成
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本悠真, B. Alinejad, 池田輝之, 高際良樹
2. 発表標題 Al-Fe-Si粉末の短時間低温焼結とその特性評価
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Takagiwa
2. 発表標題 Development of Thermoelectric Materials and Devices for Sensor Applications
3. 学会等名 第4回量子線科学国際シンポジウム(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 B. Alinejad, Y. Yamamoto, Y. Takagiwa, T. Ikeda
2. 発表標題 Solid state modification via activated reactive consolidation for fabrication of intermetallic thermoelectric materials
3. 学会等名 第4回量子線科学国際シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Aoki, H. Matsui, A. Ikeda, T. Ikeda
2. 発表標題 Examination of the phase diagram of the Al-Fe-Si system using multiple diffusion method
3. 学会等名 第4回量子線科学国際シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nishimine, A. Saitoh, T. Ikeda, Y. Takagiwa
2. 発表標題 Fabrication of a single phase 1-Al ₂ Fe ₃ Si ₃ thermoelectric material via unidirectional solidification
3. 学会等名 第4回量子線科学国際シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ikeda
2. 発表標題 A high-throughput approach to thermoelectric materials with enhanced properties in complex material systems
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島宏康, 高際良樹, 池田輝之
2. 発表標題 FAST材熱電発電モジュール
3. 学会等名 第41回排熱発電コンソーシアム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高際良樹
2. 発表標題 温度差発電を利用したIoTセンサ用自立電源
3. 学会等名 第34回JFCAテクノフェスタ(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松井裕貴, 青木優太, 池田垂矢子, 池田輝之
2. 発表標題 Al ₂ Fe ₃ Si ₃ 相の存在組成範囲の決定
3. 学会等名 日本金属学会2020年春季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木優太, 松井裕貴, 池田垂矢子, 池田輝之
2. 発表標題 マルチプル拡散法の確立とAl-Fe-Si系状態図の作成
3. 学会等名 日本金属学会2020年春季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本悠真, B. Alinejad, 池田輝之, 高際良樹
2. 発表標題 ボールミル法を用いたAl-Fe-Si系熱電材料の合成とその特性評価
3. 学会等名 日本金属学会2020年春季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤真宏
2. 発表標題 熱電技術の普及拡大にむけた材料およびデバイスの開発
3. 学会等名 日本化学会第100回春季年会（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Ken Kurosaki, Yoshiki Takagiwa and Xun Shi	4. 発行年 2020年
2. 出版社 De Gruyter	5. 総ページ数 214
3. 書名 Thermoelectric Material-Principles and Concepts for Enhanced Properties	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 熱電材料、その製造方法およびそれを用いた熱電発電モジュール	発明者 高際良樹	権利者 国立研究開発法人 物質・材料研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2018/032031	出願年 2018年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 熱電材料、その製造方法およびそれを用いた熱電発電モジュール	発明者 高際良樹	権利者 国立研究開発法人 物質・材料研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、2017-166286	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

NIMS研究者データベース https://samurai.nims.go.jp/profiles/takagiwa_yoshiki
--

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	池田 輝之 (Ikeda Teruyuki) (40314421)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授 (12101)	
研究分担者	後藤 真宏 (Goto Masahiro) (00343872)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・エネルギー・環境材料研究拠点・主席研究員 (82108)	