

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02469

研究課題名（和文）未利用低温熱源を活用する高出力温度差発電材料の創製

研究課題名（英文）Synthesis of high-power thermoelectric materials to utilize unused low-temperature heat sources

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・グループリーダー

研究者番号：90549594

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の目標は「鉄・アルミニウム・シリコン系新規温度差発電材料（FAST材）」を基軸として、ビスマス・テルル系既存材料に匹敵する出力特性を達成し、室温での微小温度差発電を可能とする新材料を創製することである。冷却速度が比較的早く、量産化がある程度可能な傾角鋳造法にて合成したP型およびN型FAST材の精密組成制御を行い、熱電特性を最適化した。その結果、P型・N型ともに $130\mu\text{V}/\text{K}$ を超える高いSeebeck係数が得られ、結果としてこれまでよりも高い電気出力因子が得られた。さらに、FAST材を用いた高集積温度差発電モジュールの発電試験や実証試験を行い、実装化に向けた課題を抽出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温度差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、既存材料であるビスマス・テルル系材料を代替する新材料が必要である。室温近傍の低温排熱を利用するモジュールの普及が進めば、様々なセンサーを駆動させることのできる自立電源としての一翼を担うことが可能になる。社会実装に至るためには材料の資源性および生産コストも重要項目である。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・アルミニウム・シリコンのみから構成されるFAST材は、既存材料を代替する材料として大きな可能性を秘めており、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）：This research project aims to develop a new thermoelectric material that achieves output characteristics comparable to those of existing bismuth-telluride materials and enables small temperature difference power generation at around room temperature based on iron-aluminum-silicon thermoelectric materials (FAST materials). The thermoelectric properties were optimized by controlling the composition of P- and N-type FAST materials synthesized by the casting method. As a result, high Seebeck coefficients exceeding  $130\mu\text{V}/\text{K}$  were obtained for both P- and N-type materials, resulting in higher electrical power output. Furthermore, power generation and demonstration tests using highly integrated thermal power generation modules of FAST materials were conducted, and issues for social implementation were extracted.

研究分野：材料物性

キーワード：温度差発電材料 発電モジュール 合成プロセス 組成探索 実証試験

## 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、リモートセンサー等の電子デバイスに電力を供給する環境発電技術の構築が求められており、センサー駆動に必要な  $100 \mu\text{W}$  以上の発電能力が必要とされる。本研究では将来の大規模な普及を目指し、(1)資源制約の観点から、モジュールを構成する材料が希少元素・毒性元素を含まない汎用元素から構成されることに加えて、(2)発電用モジュール設計の観点から、化学的安定性・機械特性・耐酸化性に優れ、製造コストが低減できることを材料探索の段階から追求した。現在市販されている冷却用ペルチェモジュールを構成する材料はビスマス・テルル( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )系である。発電用モジュールの社会実装に向けた課題として、高い材料コストと希少・毒性元素であるテルルの代替、および、機械強度の向上と長期耐久性を有するモジュール化技術の確立である。すなわち、(1)発電能力、(2)化学的安定性、(3)機械強度、(4)資源性・コスト・リサイクル性、(5)低プロセスコスト、(6)耐酸化性、(7)加工性を併せ持つ温度差発電材料が必要とされる。

### 2. 研究の目的

本研究は、超スマート社会を支える基盤電源技術の構築に向けて、室温動作を可能とする高出力温度差発電材料の創製およびデバイス化応用を目指す。超スマート社会では、リモートセンサー等の電子デバイスに電力供給する環境発電技術の創出が求められている。中でも、室温近傍の未利用熱源を利用して温度差が数 $^{\circ}\text{C}$ でもデバイス駆動ができるシステムが期待されているが、コストや資源的な制約からも、既存材料  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  の代替が急務になっている。本研究の目的は、計算科学・実験・機械学習を相補的に用いた統合型材料研究により、室温近傍の僅かな温度差を活用する環境調和型の高出力温度差発電材料を創製することである。

### 3. 研究の方法

本研究課題の遂行に先立ち、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  系既存材料がなぜ高い発電性能を有するかを電子構造・バンド構造の観点から整理した。クラーク数で酸素以外の上位3位の元素から構成される Fe-Al-Si 三元系で同様の特徴を有する新材料( $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3$ )を見出し、FAST 材と命名した (**Fe-Al-Si Thermoelectric Materials**)。FAST 材の特徴は、①室温近傍での発電性能に優れること、②ドーパント無しで PN 制御が可能なこと、③耐酸化性が高く、機械特性・加工性に優れることである。これら3つの特徴は、発電モジュールの設計・普及に必須条件であり、特に②と③の特徴に関しては現行の材料系を圧倒する。

熱電変換材料の評価指標として、性能指数  $z = S^2\sigma\kappa^{-1}$  が用いられている。 $S$  はゼーベック係数、 $\sigma$  は電気伝導率、 $\kappa$  は熱伝導率である。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、 $\text{mW m}^{-1}\text{K}^{-2}$  オーダーの値が必要とされる。一方、 $\kappa$  はできるだけ低い値が望ましいが、 $S$ 、 $\sigma$  および  $\kappa$  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。 $S$ 、 $\sigma$  は、状態密度・群速度・緩和時間に依存し、 $\kappa$  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。研究対象となる  $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3$  の電子構造は、 $0.2 \text{ eV}$  程度の狭いバンドギャップを形成している。ボルツマン輸送方程式を用いて熱電物性を算出した結果、室温近傍で  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  並みに高い出力特性が得られる可能性が示唆された。しかし、Fe-Al-Si 三元系状態図は非常に複雑であり、わずかな組成のずれにより、3元系化合物と2元系化合物からなる2相または3相共存となる。本研究は、高い電気出力因子を有する FAST 材を創製するために、以下の3つの方策を提案する。

#### [1] 精密組成制御によるキャリア濃度の最適化

対象となる  $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3$  相は、Al と Si が 20at.% 程度置き換えることができ、非常に広い生成域を有している。その特徴を活かして Al と Si の割合を変えるだけで、フェルミ準位を価電子帯から伝導帯まで変化させることができ、P 型と N 型材料の作り分けが可能となる。一方で、現状の溶解のみの合成方法では、目的相の単相化には成功しておらず、第二相として FeSi 相が混入する。そのため、理論計算から予測される Seebeck 係数の値を下回っており、出力特性の低下要因となっている。更なる高出力化を図るためには、単相化および単結晶化が必要となり、垂直ブリッジマン法等を用いて合成する。

第一原理計算によると、P 型では  $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、N 型では  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  程度のキャリア濃度に調整することにより、電気出力因子が最大化され、P 型・N 型ともに  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  を越える Seebeck 係数 ( $>150 \mu\text{V/K}$ ) が得られる。単相化もしくは単結晶化に加え、最適キャリア濃度に調整することにより、現状の Seebeck 係数 ( $100 \mu\text{V/K}$ ) を大きく越える FAST 材を創製する

[2] 不純物バンドエンジニアリングによる Seebeck 係数の向上

[1]の精密キャリア濃度調整において得られた試料を更に高性能化するためには、電子構造に変調を起し、移動度を維持したまま、より大きな Seebeck 係数を得る必要がある。Fe<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>相の電子構造は、有効質量の大きなバンドは Fe の d バンドが担っており、Fe サイトを別の遷移金属で置き換えることによって、電子構造に変調を起すことが可能になる。

同様の現象が狭バンドギャップを形成する RuGa<sub>2</sub> 金属間化合物においても確認されており、置換する遷移金属によって伝導帯のバンド構造に変調を与えることができると予想される。Fe<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> 相においても、計算科学を援用することにより、価電子帯および伝導帯に変調を与え、Seebeck 係数を増大させる遷移金属を選定し、実験により最適組成を決定する。その際に、四元素の組成最適化を高速化させるために、機械学習（ベイズ最適化）も併用する。

[3] 金属異相との複合組織化による電気抵抗率の低減

[1][2]により得られる大きな Seebeck 係数を有する FAST 材の出力性能を一層向上させるためには、高い Seebeck 係数を維持したまま、電気抵抗率（内部抵抗）を低減することが求められる。

そこで、母相と極性（P 型および N 型）が一致し、室温における主相の電気伝導率を大きく上回る金属相を僅かに分散させることで、Seebeck 係数を維持したまま電気抵抗率を低減する。本材料系における複合組織化による性能向上の指針は、機械学習（ベイズ最適化）と実験との協働により見出したものである。

4. 研究成果

本研究期間内において、FAST 材に係る多様な研究成果[1-6]が得られた。以下に、代表的な本研究課題の成果（概要）を示す。

高密度のバルク FAST 材を合成するためには、現状では溶解法（目的となる半導体  $\tau_1$ -Fe<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> 相の合成）と焼結法（高密度化）を組み合わせる必要がある。そこで、FAST 材の材料製造プロセスと電気出力因子との関連を調べた。電気出力因子と微細組織との相関を調べた結果、 $\tau_1$  相の単相試料を得ることよりも、金属相である  $\epsilon$  相が少量析出することが重要であることが明らかになった（図 1）。このような微細組織は、ガスアトマイズ法で作製したサンプルに対し、900°C・24 時間の熱処理を施した材料で得られる。サンプル A（高周波溶解+ 3 週間熱処理）は FAST 材の単相試料であるが、電気伝導率が低く、電気出力因子も小さい。一方、サンプル B（ガスアトマイズ+熱処理）においては、最適な熱処理条件（900°C・24 時間）を選択することによって電気出力因子が向上する（サンプル B+900）。サンプル B の試料組織には、最大で 5% 程度の金属第二相（ $\epsilon$ -FeSi）の析出が確認されるが、 $\epsilon$  相の析出により母相の組成に僅かな変化をもたらし、

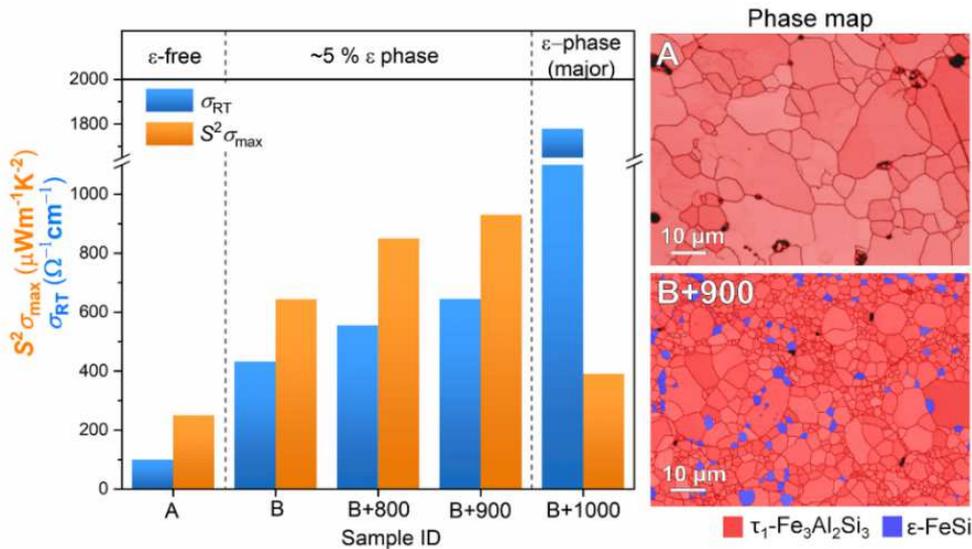


図 1 FAST 材の電気伝導率( $\sigma$ )および電気出力因子( $S^2\sigma$ )の熱処理温度依存性と試料組織の関係[5]

キャリア濃度が増加したことにより電気伝導率の改善がなされたと解釈している。

本研究では、既存プロセス以外の合成プロセスを探索した結果、冷却速度の早いプロセスを用いることが FAST 材の性能向上に寄与することが判明した（図 2）。具体的には、メルトスピン法および傾角鋳造法による合成を試みた。傾角鋳造法に関しては、幅広い組成範囲での探索を行ったが、メルトスピン法に関しては、比較的大きなバルク試料を準備する必要があり、組成依存性までは調べることはできていない。図 2 に示すように、メルトスピン法ないし傾角鋳造法にて合成した P 型および N 型 FAST 材ともに特性が大きく改善している。

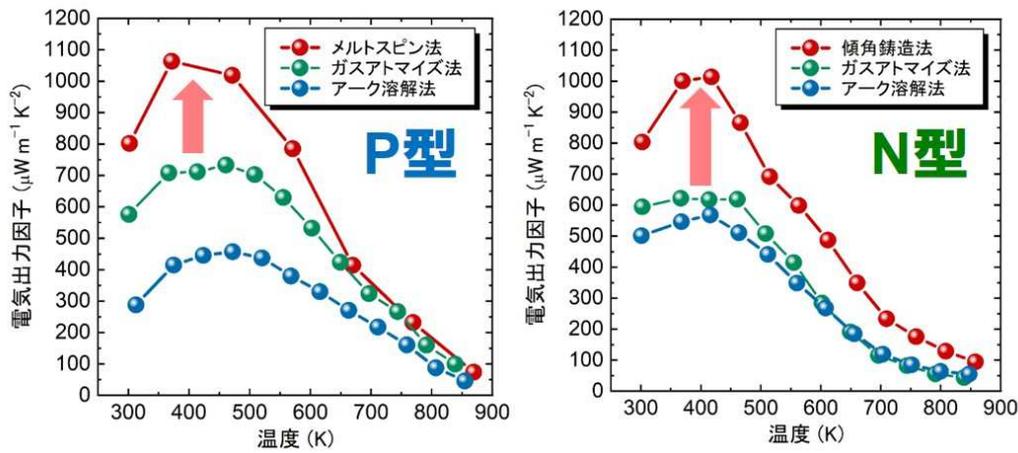


図 2 (左)P 型および(右)N 型 FAST 材の電気出力因子( $S^2\sigma$ )の合成プロセス依存性

安定的に温度差発電素子として FAST 材を用いるためには、現状の室温における  $6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  程度の熱伝導率、とりわけ格子成分を低減させる必要がある。そこで、第四元素置換による合金散乱効果の導入を検討した。Co, Re, Rh, Ru, Ga を置換した FAST 材を合成し、高密度バルク材の作製と相同定を行い、目的の材料が出来ていることを確認した。その後、フラッシュ法にて評価した熱伝導率と電気電度率とゼーベック係数から電子熱伝導率を求め、熱伝導率から電子熱伝導率を差し引くことで格子成分を見積もった。その結果を表 1 にまとめる。その結果、主として N 型 FAST 材において熱伝導率および格子熱伝導率の低減に成功し、その中でも、Co 元素が有効に機能していることが明らかになった (図 3)。

表 1 室温における熱伝導率および格子熱伝導率

第四置換元素	室温熱伝導率( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )	格子熱伝導率( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
置換前	6–7	5.8–6.5
Co	4.5(N)	4.1 (N)
Re	4.6 (N) / 5.7 (P)	4.3 (N) / 5.3 (P)
Rh	5.9 (N)	5.5 (N)
Ru	5.0 (N)	4.7 (N)
Ga	5.6 (N)	5.1 (N)

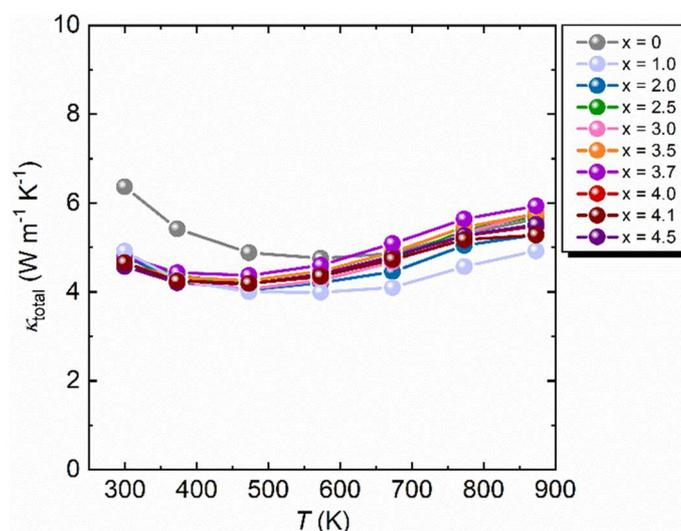


図 3 Co 元素置換した FAST 材の熱伝導率の温度依存性

低コスト、高信頼性モジュール化実現のため、FAST 材のチップ化、モジュール化を企業との共同研究により進めた。低コスト化を見据えて、窒化アルミ基板に加えて、樹脂基板を用いたモジュール化を行った。基板構成は窒化アルミ基板の場合、基材に窒化アルミ、電極に Cu めっき + Ni めっき + Au めっきとした。樹脂基板は基材にガラスエポキシ樹脂、電極は低コスト化を見据えて Cu 箔のみの構成である。この構成にすることにより部材コストは 1/10 以下とすることが可能となる。なお、チップと電極ははんだ付けで接合を行った。試作モジュールの発電特性は図 4 の通りである。樹脂基板は窒化アルミ基板と比較して 7 割強の発電量となった。両者の差は基材の熱伝導の差によるものと考えられる。ただし、樹脂基板は大幅なコスト低減が見込めるため、ニーズに合わせた選択肢として十分に可能性がある。

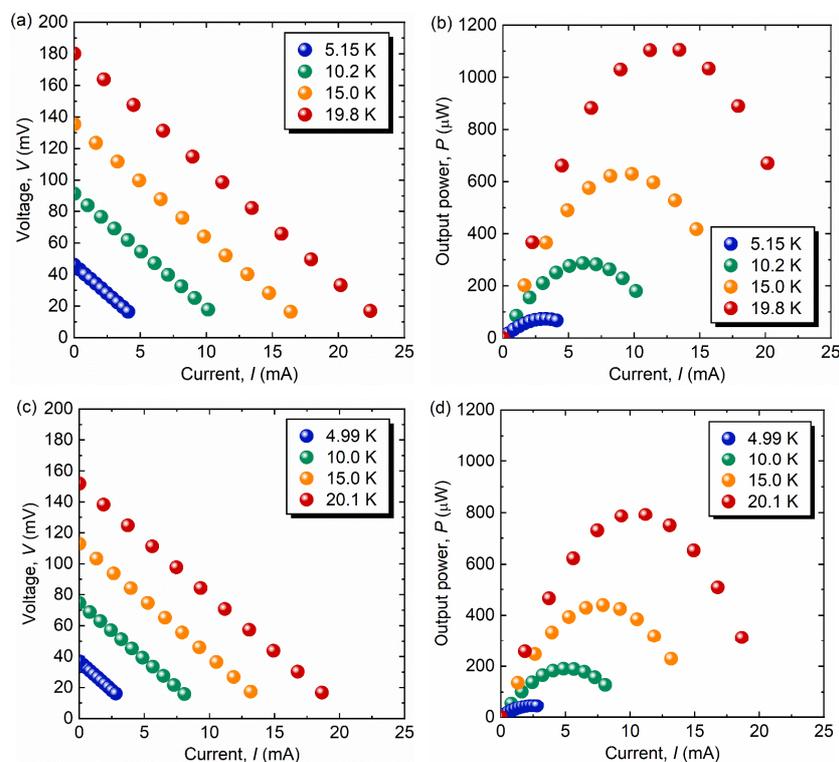


図 4 (a,b)窒化アルミ基板および(c,d)樹脂基板を用いた温度差発電モジュールの出力特性

#### 【参考文献】

- [1] Y. Takagiwa, T. Ikeda, and H. Kojima, “Earth-Abundant Fe-Al-Si Thermoelectric (FAST) Materials: from Fundamental Materials Research to Module Development”, *ACS Applied Materials & Interfaces* **12**, 48804–48810 (2020).
- [2] N. Sato and Y. Takagiwa, “First-Principles Study on Lattice Dynamics and Thermal Conductivity of Thermoelectric Intermetallics  $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3$ ”, *crystals* **11**, 388–1–10 (2021).
- [3] Z. Hou, Y. Takagiwa, Y. Shinohara, Y. Xu, and K. Tsuda, “First-principles study of electronic structures and elasticity of  $\text{Al}_2\text{Fe}_3\text{Si}_3$ ”, *Journal of Physics: Condensed Matter* **33**, 195501–1–15 (2021).
- [4] Y. Takagiwa, Z. Hou, K. Tsuda, T. Ikeda, and H. Kojima, “Fe–Al–Si Thermoelectric (FAST) Materials and Modules: Diffusion-Couple and Machine-Learning Assisted Materials Development”, *ACS Applied Materials & Interfaces* **13**, 53346–53354 (2021).
- [5] A. K. Srinithi, H. Sepehri-Amin, Y. Takagiwa, and K. Hono, “Effect of microstructure on the electrical conductivity of p-type Fe–Al–Si thermoelectric materials”, *Journal of Alloys and Compounds* **903**, 163835–1–8 (2022).
- [6] S. Tsuda, A. Yoshinari, S. Takezawa, K. Ohishi, N. Nagamura, W. Zhang, Y. Iwasaki, and Y. Takagiwa, “Effect of carrier doping on the electronic states of earth-abundant Fe–Al–Si thermoelectric materials”, *Materials Research Express* **10**, 055506–1–10 (2023).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 N. Sato and Y. Takagiwa	4. 巻 11
2. 論文標題 First-Principles Study on Lattice Dynamics and Thermal Conductivity of Thermoelectric Intermetallics Fe <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 crystals	6. 最初と最後の頁 388-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cryst11040388	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 33
2. 論文標題 First-principles study of electronic structures and elasticity of Al <sub>2</sub> Fe <sub>3</sub> Si <sub>3</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 195501-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/abe474	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 Y. Takagiwa, R. Maeda, S. Ohhashi, and A. P. Tsai	4. 巻 14
2. 論文標題 Reduction of Thermal Conductivity for Icosahedral Al-Cu-Fe Quasicrystal through Heavy Element Substitution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 materials	6. 最初と最後の頁 5238-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma14185238	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, Z. Hou, K. Tsuda, T. Ikeda, and H. Kojima	4. 巻 13
2. 論文標題 Fe-Al-Si Thermoelectric (FAST) Materials and Modules: Diffusion-Couple and Machine-Learning Assisted Materials Development	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 53346-53354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmi.1c04583	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 高際良樹	4. 巻 60
2. 論文標題 機械学習を活用したFe-Al-Si系熱電材料(FAST材)の研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 までりあ	6. 最初と最後の頁 542-545
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.60.542	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 58
2. 論文標題 Fe-Al-Si系新規熱電材料の創製とモジュール開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 材料の科学と工学	6. 最初と最後の頁 212-215
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 91
2. 論文標題 低温熱源を有効活用する環境調和型熱電材料・デバイスの開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 金属	6. 最初と最後の頁 566-572
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 B. Alinejad, Y. Takagiwa, and T. Ikeda	4. 巻 3
2. 論文標題 Activated Reactive Consolidation Method as a New Approach to Enhanced Thermoelectric Properties of n-Type Nanostructured Mg <sub>2</sub> Si	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 4457-4465
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00152	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 P. Jood, J. P. Male, S. Anand, Y. Matsushita, Y. Takagiwa, M. G. Kanatzidis, G. J. Snyder, and M. Ohta	4. 巻 142
2. 論文標題 Na Doping in PbTe-Solubility, Band Convergence, Phase Boundary Mapping, and Thermoelectric Properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 15464-15475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.0c07067	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 Y. Takagiwa, T. Ikeda, and H. Kojima	4. 巻 12
2. 論文標題 Earth-Abundant Fe-Al-Si Thermoelectric (FAST) Materials: from Fundamental Materials Research to Module Development	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 48804-48810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c15063	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 -
2. 論文標題 機械学習を用いた低コストかつ無害な新規熱電材料の出力向上	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 材料およびプロセス開発のためのインフォマティクスの基礎と研究開発最前線	6. 最初と最後の頁 136-142
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 A.K. Srinithi, H. Sepehri-Amin, Y. Takagiwa, and K. Hono	4. 巻 303
2. 論文標題 Effect of microstructure on the electrical conductivity of p-type Fe-Al-Si thermoelectric materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 163835
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2022	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 and K. Kimura	4. 巻 219
2. 論文標題 Reinvestigation of the thermoelectric properties of Fe-substituted icosahedral Al-Pd-Re quasicrystals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 physica status solidi (a)	6. 最初と最後の頁 2200073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.202200073	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	4. 巻 15
2. 論文標題 Thermoelectric Properties of Co-Substituted Al-Pd-Re Icosahedral Quasicrystals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 materials	6. 最初と最後の頁 6816
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma15196816	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 S. Tsuda, A. Yoshinari, S. Takezawa, K. Ohishi, N. Nagamura, W. Zhang, Y. Iwasaki, and Y. Takagiwa	4. 巻 10
2. 論文標題 Effect of carrier doping on the electronic states of earth-abundant Fe-Al-Si thermoelectric materials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Research Express	6. 最初と最後の頁 55506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2053-1591/acd438	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14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 高際良樹, Zhufeng Hou, 津田宏治, 池田輝之, 小島宏康
2. 発表標題 実験・計算科学・機械学習を用いたFe-Al-Si熱電材料 (FAST材) の研究
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 高際良樹, 池田輝之, 小島宏康
2. 発表標題 Fe-Al-Si熱電材料および発電モジュールの研究開発
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 P. Jood, J. P. Male, S. Anand, Y. Matsushita, Y. Takagiwa, M. G. Kanatzidis, G. J. Snyder, M. Ohta
2. 発表標題 Na doping in PbTe: conventional dopant, new outlook
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. K. Srinithi, H. Sepehri-Amin, Y. Takagiwa, and K. Hono
2. 発表標題 Microstructure of high power-factor p-type Al-Fe-Si thermoelectric material
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 角俊輔, 池田輝之, 高際良樹
2. 発表標題 反応焼結法による $\text{FeSi}_2$ 熱電材料の单相作製
3. 学会等名 日本金属学会2022年春期講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松井裕貴, 西峯広智, 山本悠真, 池田亜矢子, 高際良樹, 池田輝之
2. 発表標題 Al <sub>2</sub> Fe <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> の存在組成範囲と熱電特性の組成依存性
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期講演大会
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 ホールミリング法を用いたAl-Fe-Si系熱電材料の作製と特性評価
3. 学会等名 第17回日本熱電学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高際良樹, 池田輝之, 小島宏康, 吉見仁志, 原口昇, 石井智
2. 発表標題 次世代交通システムの構築に向けた熱電材料およびモジュール・システム開発: 現状と課題
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 岩崎祐昂, 北原功一, 木村薫, 高際良樹
2. 発表標題 チムニラダー型化合物Ru(Al,Si) の熱電特性
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 尾曾竜之介, 中山成哉, 池田輝之, 池田亜矢子, 高際良樹
2. 発表標題 マルチプル拡散法による4, 5元系Fe-Al-Si-X1-X2における熱電材料の探索
3. 学会等名 日本金属学会2022年秋期講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 角俊輔, 池田輝之, 高際良樹
2. 発表標題 反応焼結法により作製した $\text{-FeSi}_2$ 系熱電材料の特性評価
3. 学会等名 日本金属学会2022年秋期講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 百合嶋隆太, 池田亜矢子, 池田輝之, 高際良樹
2. 発表標題 温度傾斜熱処理による効率的な状態図調査
3. 学会等名 日本金属学会2022年秋期講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 趙至洋, 池田輝之, 高際良樹
2. 発表標題 ナノコンポジット構造化 $\text{Al}_2\text{Fe}_3\text{Si}_3\text{-FeSi}$ の作製と熱電特性
3. 学会等名 日本金属学会2023年春季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾曾竜之介, 中山成哉, 池田輝之, 池田亜矢子, 高際良樹
2. 発表標題 マルチプル拡散法による4, 5元系Fe-Al-Si-X1-X2における熱電材料の探索
3. 学会等名 日本金属学会2023年春季講演大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap <a href="https://researchmap.jp/takagiwayoshiki">https://researchmap.jp/takagiwayoshiki</a>
--

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