

大型プレスを利用したスクッテルダイト系熱電変換材料の合成と熱電特性

Synthesis of Skutterudite-type Thermoelectric Materials by Using a Large Press and Their Thermoelectric Properties

Key-words : High-pressure synthesis method, Skutterudite, Thermoelectric material, Self-insertion reaction

関根 ちひろ

Chihiro SEKINE

(Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology)

1. はじめに

熱電変換材料は、直接かつ高効率に熱エネルギーと電気エネルギーの相互変換が可能な材料であり、ペルチェ効果を利用した熱電冷却やゼーベック効果を利用した熱電発電に利用される材料である。熱電変換材料を用いた熱電変換モジュールの用途として、熱電冷却では、小型冷蔵庫、センサーやレーザー発振器の冷却、PCR 検査用の医療機器の温度制御などがある。熱電発電では、深宇宙探査機の電源、体温と外気温の温度差だけで動作するスマートウォッチなどに使用されている。さらに、近年は、未利用熱エネルギーを有効活用できる再生可能エネルギーとしても、熱電発電は注目されている。しかし、現状の熱電変換材料は幅広い利用を可能にするのに十分な変換効率を実現できておらず、熱電発電をさらに普及させるためには、変換効率の高い熱電変換材料の開発が不可欠である。

2. 熱電変換材料

熱電変換材料の性能は、式(1)で表される性能指数 $Z(K^{-1})$ で評価される¹⁾。

$$Z = \frac{\sigma S^2}{\kappa} \quad (1)$$

ここで、 $S(VK^{-1})$ はゼーベック係数、 $\sigma(Sm^{-1})$ は電気伝導率、 $\kappa(Wm^{-1}K^{-1})$ は熱伝導率である。さらに、熱伝導率 κ は電子系による寄与（電子熱伝導率） κ_E と格子系による寄与（格子熱伝導率） κ_L の和で表される。作動温度域を考慮した熱電変換材料の性能は $Z(K^{-1})$ に絶対温度 $T(K)$ を乗じた無次元性能指数 ZT で評

価され、 $ZT > 1$ が実用化の目安とされている。しかし、 $ZT = 1$ 程度の現在実用化されているビスマステル系熱電変換材料の理論発電効率は 9% 程度であり¹⁾、他の発電システムに対するコスト競争力を含めて、熱電発電の普及が促進されるレベルには達していない。この問題の解決には、熱電変換材料の変換効率を大きく向上させることが必要である。(1)式より、理想的な熱電変換材料は、高い S を有し、電気は結晶のように通す（高い σ ）が、熱（フォノン）はガラスのように通さない（低い κ ）物質「Phonon Glass, Electron Crystal (PGEC) 物質」である²⁾。 S と σ 、 κ_E はいずれもキャリア濃度の関数であり、 S と σ （および κ_E ）は、トレードオフの関係にあるため、 σS^2 が最大値をとるキャリア濃度の最適化が不可欠である。キャリア濃度を最適化した上でさらに熱電性能を向上させるためには、キャリア濃度に関係なく制御可能な κ_L の低減が重要である。我々は、この κ_L の低減に焦点を当て、高圧力技術を駆使した熱電変換材料の開発を進めている。本稿では、大型プレスを利用したスクッテルダイト系熱電変換材料の研究・開発の現状について紹介する。

3. 大型プレスを用いた高压合成

スクッテルダイト系熱電変換材料の合成には、大型プレスを用いた数 GPa の圧力下での高压合成法が有効である。高压合成法の利点は、①蒸気圧が高い元素と融点の高い元素を反応させる際、常圧合成では組成のずれが生じやすいが、高压合成は密閉空間での合成であるため、組成比を変えずに反応させることが可能であること、②イオンの圧縮率の違いを利用して、常圧下では合成不可能な試料の合成が可能となる場合があることなどである³⁾。我々は、2 種類の大型油圧プレス装置を用いて、スクッテルダイト系熱電変換材料の高压合成を行なっている。一つは、立方体の圧力媒体（圧力を伝える物質）を加圧するキュービックアンビル装置（500 トンプレス）、もう一つは、正八面体の圧力媒体を加圧する川井型 2 段式マルチアンビル装置（1500 トンプレス）である。ここで、アンビルとは、もともとの意味は鍛冶や金属加工の際に用いる金床であるが、炭化タングステン（WC）や、天然ダイヤモンド、焼結ダイヤモンド（SD）などの超硬材料製で、円錐形の先端や立方体の角を平面で切った形状のものを高压実験では「アンビル」と呼んでいる。このアンビルの先端の面積を小さくし、油圧プレスによって大きな力を加えることで、超高压を発生させる。2 種類の大型油圧プレス装置について、以下に詳しく述べる。

キュービックアンビル装置は、6個のアンビルにより立方体の圧力媒体を6方向から均等に加圧することができる装置である。我々は、主に先端面積 $12 \times 12 \text{ mm}^2$ の炭化タングステン (WC) 製アンビルを使用しており、1辺 16 mm の立方体の圧力媒体を用い、約 50 mm^3 の試料を 4 GPa 程度まで加圧できる。圧力媒体の材料はパイロフィライトとよばれる柔らかい石を用い、立方体の形状に加工して使用する。高温の発生には、グラファイト、ランタンクロマイト (LaCrO_3) 系セラミック、レニウム等の金属箔を材料として円筒型に加工したヒーターを立方体の圧力媒体内部に設置し、上下2つのアンビル面から金属製のリングとディスクを介して電流を流す電流加熱方式を用いている。ヒーターの内側には、各元素粉末の混合物などの出発原料を入れた窒化ホウ素 (BN) 製の試料カプセルを設置する。これらの各パーツは合成のつど、製作する必要があり、いわば「超高压環境下で使用できる使い捨て小型電気炉」といえる。

一般的な高压合成のプロセスは、まず目標圧力まで少しずつ圧力を上昇させ、目標圧力に達したら、圧力を保持する。次に立方体の圧力媒体内部に設置したヒーターに通電し、反応させる温度まで昇温する。高温高压状態を一定時間保持した後、加熱電源の出力を短時間で0にし、室温まで急冷する (クエンチとよぶ)。その後、ゆっくりと減圧し、試料を回収する。

5 GPa 以上の圧力での高压合成には、川井型 2 段式マルチアンビル装置を利用している。川井型 2 段式マルチアンビル装置は、1 段目にキュービックアンビル装置を用い、その加圧力を 2 段目アンビルに伝え、より高い圧力を発生させる装置である。2 段目アンビルは、WC 製の立方体の角を面取りされたもの 8 個を立方体状に組み上げ、中央に正八面体の圧力媒体を置き、加圧できるようになっている。つまり、6 方向からの力を 8 個のアンビルに伝え、8 方向から加圧することに

より、キュービックアンビル装置より高い圧力の発生を可能にしている。我々は、主に先端切り欠き長さ (TEL: triangle edge length) 11 mm で正三角形に角を削った WC 製アンビルを使用し、1 辺 18 mm の酸化マグネシウム (MgO) 製の正八面体を用い、約 30 mm^3 の試料を 8 GPa 程度まで加圧可能である。パーツ構成はキュービックアンビル装置と基本的に同じである。高压合成の詳細は、我々のこれまでの報告を参照していただきたい^{4)~7)}。

4. スクッテルダイト系熱電変換材料

CoSb_3 に代表されるスクッテルダイト化合物の結晶構造は体心立方晶系に属し (図 1)、空間群は $Im\bar{3}$ である⁸⁾。一般形は TX_3 あるいは $\square\text{T}_4\text{X}_{12}$ ($\text{T}=\text{Co}, \text{Rh}, \text{Ir}, \text{Ni}, \text{X}=\text{P}, \text{As}, \text{Sb}$) で表される。 $\square$ は X 原子がつくるカゴ内部の大きな空隙 (2a サイト) を表し、この空隙はちょうど原子一個を内包することができるほどのサイズである。 TX_3 化合物の中でも特に、 CoSb_3 は、高いゼーベック係数、非常に高い正孔移動度 (室温で $3000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) を有するなど熱電変換材料に適した特性を示す⁹⁾。これらの特性はその特有なバンド構造に由来していると考えられる。バンド計算から、 CoSb_3 は価電子帯と伝導帯が Γ 点で直接遷移型の狭バンドギャップを形成し、価電子帯で直線的なエネルギー分散をもつ p 型半導体であり、バンドギャップ幅は Sb 原子の位置に非常に敏感であることが示されている^{10), 11)}。

CoSb_3 は高い出力因子 (σS^2) を示す一方で、 κ_L が高い欠点がある (室温で約 $0.1 \text{ W}/\text{cmK}$ 程度)¹²⁾。この値は Bi_2Te_3 系材料に比べると 7~8 倍高い。しかし、この欠点は、12 個の Sb 原子によって形成される大きなカゴ内部の空隙をゲスト原子 R ($\text{R}=\text{アルカリ土類金属元素}, \text{希土類金属元素}, \text{第 13 族元素希など}$) で部分的に充填することで改善される。これは、ゲスト

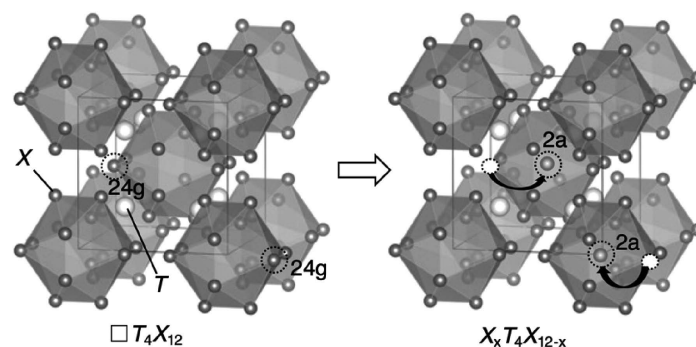


図 1 スクッテルダイト化合物 TX_3 ($\square\text{T}_4\text{X}_{12}$) の結晶構造と圧力誘起自己充填反応

原子がカゴ内部で大きな振幅で振動し、フォノンによる熱の伝播を阻害する（「ラットリング効果」と呼ばれる）ためであると考えられている。実際、充填スキテルダイト化合物 $\text{CeRu}_4\text{Sb}_{12}$ （ $\square\text{Ru}_4\text{Sb}_{12}$ に Ce がゲスト原子として充填されたものとみなせる）の非弾性中性子散乱実験により、低エネルギーの光学フォノンの存在と音響フォノンとの反交差的な挙動が示された¹³⁾。この実験結果に基づき、 κ_L の低減の原因は、ゲスト原子 Ce による低エネルギー光学フォノンがウムクラップ過程の発生確率を高めたためとの解釈できる。

これまでに、アルカリ土類金属元素、希土類金属元素、第13族元素（Ga, In, Tl）などのさまざまな元素が CoSb_3 のゲスト原子として用いられ、部分充填された多くの試料 $R_x\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ が合成され κ_L の低減と性能指数の向上が報告されている^{14)~24)}。同程度の充填率であってもゲスト原子の種類によって、 κ_L の低減率が異なり、充填するゲスト原子のイオン半径が小さいほど（ゲスト原子 R とカゴを形成する Sb 原子との距離（ r_{GFD} ）が長いほど）、また、 R の原子量が大いほど、 κ_L が低減される傾向にある²⁵⁾。 r_{GFD} が長く、原子量が大い Yb を部分的に充填した $\text{Yb}_{0.3}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ の κ_L は大幅な低減を示し、 ZT が 850 K で 1.5 に達したとの報告がある²⁶⁾。ゲスト原子を、複数種にすることで、さらに熱伝導率の低減が顕著になり熱電性能の向上が報告されている^{27)~32)}。 $\text{Ba}_x\text{La}_y\text{Yb}_z\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ の ZT は、800 ~ 850 K で 1.7 ~ 1.9 を示すことが報告されている³¹⁾。また、ゲスト原子の充填率の増加に伴い、 κ_L の低減率は上昇することも知られている。しかし、常圧下ではイオン半径の大きい軽希土類元素や、化合物中で2価のイオンとなる希土類元素（Eu, Yb 等）など限られた種類の元素を、数%~十数%程度しか充填させることができない。さらなるゲスト原子の高充填化には、大型プレスを用いた高压合成法の利用が有効である。その理由として、常圧下では、ゲスト原子が周りのカゴ状構造を形成する Sb 原子と安定な化学結合を形成しにくい場合であっても、高压力環境下では、各イオンの圧縮率の違いにより、ゲスト原子と Sb 原子との化学結合が形成されやすくなることが考えられる。常圧に戻した際に構造が不安定となる場合もあるが、スキテルダイト系材料では、高充填試料が準安定相として得られる場合が多い。

5. 高压合成法による高充填化

CoSb_3 （ $\square\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ ）は、カゴ状構造内部の空隙（ $\square$ ）に、ゲスト原子 R を部分的に充填すること（ $R_x\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ ）

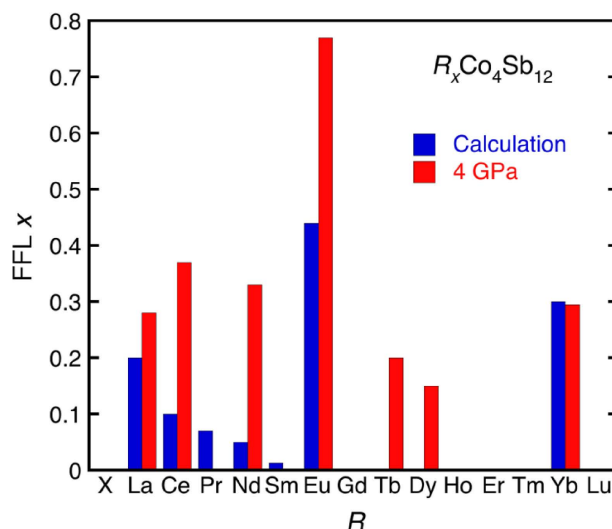


図2 理論計算に基づく $R_x\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ における各希土類元素の充填率限界（FFL）の予測値、および4 GPa で合成した試料の最大充填率の実験値³³⁾

で、 κ_L が低減し、 ZT が向上する。さらに、ゲスト原子の充填率 x の増加とともに κ_L の低減率は上昇する。しかし、常圧下での合成では、充填可能な元素が限られており充填率にも限界がある。図2は Mei らによる理論計算に基づく $R_x\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ （ R = 希土類元素）における各希土類元素の充填率限界（FFL）の理論予測値、および4 GPa で合成した試料の最大充填率（実験値）を示している^{33), 34)}。ランタノイド収縮により希土類イオンの半径が小さくなるため、FFL の理論予測値は、軽希土類から重希土類になるほど低くなり、Gd 以上では0となっている。例外的に Eu と Yb の FFL の理論予測値が他の希土類元素より高い値を示しているのは、多くの希土類元素は +3 価のイオンとして充填されるのに対し、Eu と Yb は、+2 価で充填されるためと考えられる。4 GPa で合成した試料の最大充填率の実験値は、Yb に関しては理論予測値と近い値であったが、ほとんどの希土類元素で、常圧での理論予測値よりも高くなっている。このように高压合成法を用いることで、常圧での充填限界を超える充填率の試料合成が可能である。とりわけ FFL 理論予測値が0である Tb および Dy の部分充填も高压合成法では作製可能であることは、スキテルダイト系熱電変換材料の設計の幅を広げることになる²⁵⁾。

CoSb_3 へのゲスト原子 R の部分充填は、希土類元素以外でも可能である。インジウム（In）をゲスト原子として部分充填を行う場合（ $\text{In}_x\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ ）、常圧での合成では、充填率 x の最大値は0.26であるのに対し³⁵⁾、4 GPa で合成した試料では最大充填率は $x=0.64$ まで上昇した²⁵⁾。また、 $\text{In}_{0.64}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ の室温における

κ_L の値は、常圧で合成された実際の In 充填率が 0.26 の試料の κ_L よりも低い値 ($3.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) を示すことも確認された^{25), 35)}。

6. 圧力誘起自己充填反応

スクッテルダイト化合物 TX_3 ($\square T_4X_{12}$) は超高压力下で、不可逆的にセル体積の大きな同一対称性の高压相に変化する「圧力誘起自己充填反応」が発現することが報告されている^{36), 37)}。この異常な現象は、カゴを形成する 24 g サイトの X 原子の一部が、カゴ内の空隙 (2a サイト ($\square$)) に入り込む ($\square T_4X_{12} \rightarrow X_xT_4X_{12-x}$) ためと解釈できる (図 1)。最大エントロピー法を用いた $\text{Sb}_x\text{Co}_4\text{Sb}_{12-x}$ の放射光 X 線回折データを用いた電荷密度分布の解析結果は、自己充填反応が実際に起こっていることを示唆している³⁸⁾。自己充填反応によってケージ内の空隙に Sb がゲスト原子として充填されるならば、原子質量が軽希土類元素に近く、イオン半径が小さいため、 κ_L が大幅に減少することが期待される。我々は、大型プレスを用いて高压相 (圧力誘起自己充填相) $\text{Sb}_x\text{Rh}_4\text{Sb}_{12-x}$ の作製に成功し、室温における κ_L の値が $1.32 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ を示し、低压相 (非充填相) RhSb_3 より 77% 減少することを確認した³⁹⁾。この値は RhSb_3 系単一充填スクッテルダイトの中で最も低い値である^{40), 41)}。これは、ラットリング効果に加えて、Sb ケージの部分的な変形の影響によるものと考えられる。

7. おわりに

本稿では、大型プレスを用いたスクッテルダイト型熱電変換材料の研究・開発の現状について紹介した。特に、キャリア濃度の最適化とは独立に制御可能な κ_L の低減に焦点を当て、高圧力技術を駆使した熱電変換材料の開発手法について紹介した。圧力誘起自己充填反応などの超高压プロセスは、カゴ状構造をもつ熱電変換材料の性能向上に有効な手法であると考えており、スクッテルダイト以外の系にも適用可能ではないかと考えている。

謝 辞 本稿で紹介した研究の一部は、日本学術振興会の科学研究費助成事業 (23340092, 19K03735, 22K19076) の支援を受けて行われました。ここに深く感謝いたします。東京大学物性研究所における共同利用実験では、後藤弘匡氏にご協力頂きました。深く感謝いたします。また、本研究を共に進めてきた学生諸氏に対して、この場を借りて厚く御礼を申し上げます。

文 献

- 1) 坂田 亮編, 熱電変換 ―基礎と応用― (裳華房, 東京, 2005)。
- 2) G. A. Slack, in CRC Handbook of Thermoelectrics, ed. D. M.

- Rowe (CRC press, Boca Raton, 1995) Chap. 34, pp.407–440.
- 3) 八木健彦, 超高压の世界 (岩波書店, 東京, 2002)。
 - 4) 梶川武信監修, 熱電変換技術ハンドブック (エヌ・ティー・エス出版, 東京, 2008) 第 2 章 p. 81。
 - 5) 関根ちひろ, 高圧力の科学と技術, **16**, 336 (2006)。
 - 6) 関根ちひろ, 化学工業, **66**, 171 (2015)。
 - 7) C. Sekine and Y. Mori, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56**, 05FA09 (2017)。
 - 8) I. Oftedal, XXXIII. Die Kristallstruktur von Skutterudit Und Speiskobalt-Chloanthit. *Zeitschrift für Krist. – Cryst. Mater.*, **66**, 517 (1928)。
 - 9) D. T. Morelli, T. Caillat, J.-P. Fleurial, A. Borshchevsky, J. Vandersande, B. Chen and C. Uher, *Phys. Rev. B*, **51**, 9622 (1995)。
 - 10) D. J. Singh and W. E. Pickett, *Phys. Rev. B*, **50**, 11235 (1994)。
 - 11) J. O. Sofo and G. D. Mahan, *Phys. Rev. B*, **58**, 15620 (1998)。
 - 12) B. C. Sales, D. Mandrus and R. K. Williams, *Science*, **272**, 1325 (1996)。
 - 13) C. H. Lee, I. Hase, H. Sugawara, H. Yoshizawa and H. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **75**, 123602 (2006)。
 - 14) D. T. Morelli, T. Caillat, J.-P. Fleurial, A. Borshchevsky, J. Vandersande, B. Chen and C. Uher, *Phys. Rev. B*, **51**, 9622 (1995)。
 - 15) G. S. Nolas and G. Fowler, *J. Mater. Res.*, **20**, 3234 (2005)。
 - 16) V. V. Khovaylo, T. A. Korolkov, A. I. Voronin, M. V. Gorshenkov and A. T. Burkov, *J. Mater. Chem. A*, **5**, 3541 (2017)。
 - 17) A. Harnwungmong, K. Kurosaki, H. Muta and S. Yamanaka, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 202107 (2010)。
 - 18) F. Serrano-Sánchez, J. Prado-Gonjal, N. M. Nemes, N. Biskup, M. Varela, O. J. Dura, J. L. Martinez, M. T. Fernández-Díaz, F. Fauth and J. A. Alonso, *J. Mater. Chem. A*, **6**, 118 (2018)。
 - 19) Y. Mona, J. Hayashi, Y. Kawamura, K. Kihou, H. Nishiate, C. H. Lee and C. Sekine, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **57**, 125506 (2018)。
 - 20) V. L. Kuznetsov, L. A. Kuznetsova and D. M. Rowe, *J. Phys. Condens. Matter*, **15**, 5035 (2003)。
 - 21) Y. Chen, Y. Kawamura, J. Hayashi and C. Sekine, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, 055501 (2015)。
 - 22) X. Li, Q. Zhang, Y. Kang, C. Chen, L. Zhang, D. Yu, Y. Tian and B. Xu, *J. Alloy. Compd.*, **677**, 61 (2016)。
 - 23) X. Y. Zhao, X. Shi, L. D. Chen, W. Q. Zhang, W. B. Zhang and Y. Z. Pei, *J. Appl. Phys.*, **99**, 053711 (2006)。
 - 24) Y. Kang, F. Yu, C. Chen, Q. Zhang, H. Sun, L. Zhang, D. Yu, Y. Tian and B. Xu, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **28**, 8771 (2017)。
 - 25) K. Awaji, R. Nakajima, K. Nishimura, T. Takedachi, T. Ando, Y. Kawamura, H. Gotou and C. Sekine, *Mater. Trans.*, **63**, 776 (2022)。
 - 26) S. Wang, J. R. Salvador, J. Yang, P. Wei, B. Duan and J. Yang, *NPG Asia Mater.*, **8**, e285 (2016)。
 - 27) X. Shi, H. Kong, C.-P. Li, C. Uher, J. Yang, J. R. Salvador, H. Wang, L. Chen and W. Zhang, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 182101 (2008)。
 - 28) D. Qin, B. Cui, X. Meng, P. Qin, L. Xie, Q. Zhang, W. Liu, J. Cao, W. Cai and J. Sui, *Mater. Today Phys.*, **8**, 128 (2019)。
 - 29) M. B. A. Bashir, M. F. M. Sabri, S. M. Said, Y. Miyazaki, I. A. Badruddin, D. A. A. Shnawah, E. Y. Salih, S. Abushousha and M. H. Elshikh, *J. Solid State Chem.*, **284**, 121205 (2020)。
 - 30) J. Kim, Y. Ohishi, H. Muta and K. Kurosaki, *Mater. Trans.*, **60**, 1078 (2019)。
 - 31) X. Shi, J. Yang, J. R. Salvador, M. Chi, J. Y. Cho, H. Wang, S. Bai, J. Yang, W. Zhang and L. Chen, *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 7837 (2011)。
 - 32) G. Rogl, A. Grytsiv, P. Rogl, N. Peranio, E. Bauer, M. Zehetbauer and O. Eibl, *Acta Mater.*, **63**, 30 (2014)。

- 33) 関根ちひろ, 高圧力の科学と技術, **33**, 10 (2023).
- 34) Z. G. Mei, W. Zhang, L. D. Chen and J. Yang, *Phys. Rev. B*, **74**, 153202 (2006).
- 35) J. Leszczynski, V. Da Ros, B. Lenoir, A. Dauscher, C. Candolfi, P. Masschelein, J. Hejtmanek, K. Kutorasinski, J. Tobola, R. I. Smith, C. Stiewe and E. Müller, *J. Phys. D*, **46**, 495106 (2013).
- 36) A. C. Kraemer, M. R. Gallas, J. A. H. da Jornada and C. A. Perotoni, *Phys. Rev. B*, **75**, 024105 (2007).
- 37) K. Matsui, K. Yamamoto, T. Kawaai, Y. Kawamura, J. Hayashi, K. Takeda and C. Sekine, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **81**, 104604 (2012).
- 38) F. Miotto, C. A. Figueirêdo, G. R. Ramos, C. L. G. Amorim, M. R. Gallas and C. A. Perotoni, *J. Appl. Phys.*, **110**, 043529 (2011).
- 39) K. Awaji, K. Nishimura, K. Suwa, J. Hayashi, Y. Kawamura, K. Takeda, H. Gotou and C. Sekine, *Mater. Today Commun.*, **36**, 106825 (2023).
- 40) J. Sirimart, J. Hayashi, Y. Kawamura, K. Kihou, H. Nishiate, C. H. Lee and C. Sekine, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58**,

081006 (2019).

- 41) J. Eilertsen, J. Li, S. Rouvimov and M. A. Subramanian, *J. Alloy. Compd.*, **509**, 6289 (2011).

筆者紹介



関根 ちひろ (せきね ちひろ)

1991年北海道大学大学院博士前期課程修了。
1994年室蘭工業大学大学院博士後期課程修了。
同大学助手, 准教授を経て, 2012年より室蘭工業大学大学院教授, 2021年より室蘭工業大学希土類材料研究センター長(兼任), 博士(工学)専門分野は, 強相関電子系, 電気電子材料, 現在の研究テーマは, 希土類化合物の機能性材料への応用。

〔連絡先〕 〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1 室蘭工業大学大学院工学研究科

E-mail: sekine@muroran-it.ac.jp