# 熱電変換材料として魅力的な人工硫化銅鉱物と それを用いた発電モジュールの開発

末國晃一郎", 高 畠 敏 郎", 太 田 道 広", 山 本 淳2,\*

# 1. はじめに

小特集

自然界に存在するエネルギー源の中で、資源埋蔵量に限り がある化石燃料は枯渇性エネルギー源に分類される.一方, 太陽光,水力,風力,地熱,太陽熱などはいくら利用しても 自然に再生されることから,再生可能エネルギーと呼ばれ る.枯渇性エネルギー由来の未利用熱エネルギーや再生可能 熱エネルギーを電力に変換すれば,枯渇性エネルギーの消費 量を抑えられるので,エネルギーの持続性が高まると期待さ れている.

熱を電力に直接変換する技術の一つに、ゼーベック効果を 利用した熱電発電がある.ゼーベック効果とは、金属または 半導体からなる素子の両端に温度差 $\Delta T(=T_h-T_c)$ を付ける と、起電力 $\Delta V(\propto \Delta T)$ が生じる現象である.これは、電荷 キャリア(ホールまたは電子)が高温( $T_h$ )端から低温( $T_c$ )端 へ拡散して電荷分布に偏りが生じることに起因する.実際の 発電には、P型とN型の素子(熱電変換材料)を金属電極で 繋いだ「 $\Pi$ 型」モジュール(図1(a))を用いる.モジュール の両端の金属電極をそれぞれ高温熱源と低温熱浴に接触させ るだけで発電できるので、無振動、静音、長寿命である.

熱電変換材料の性能は,発電効率 $\eta$ と無次元性能指数ZTにより評価される.効率 $\eta$ は $\{(T_h - T_c)/T_h\} \times \{(1 + Z\bar{T})^{1/2} - 1\}/\{(1 + Z\bar{T})^{1/2} + T_c/T_h\}$ で与えられ,図1(b)に示すよう に, $Z\bar{T}$ の増大に伴って単調に増加する.ここで, $\bar{T} = (T_h + T_c)/2$ である. $T_h = 600$  K, $T_c = 300$  K の場合に $\eta \ge 10\%$ となる $Z\bar{T} \ge 1$ が実用化の指標とされている.実際には材料 のZは温度に依存するため、 $\eta \ge 10\%$ を得るには広い温度範 囲で $ZT \ge 1$ を満たす必要がある.

無次元性能指数 ZTは、ゼーベック係数 S、電気抵抗率  $\rho$ 、および熱伝導率  $\kappa$  を用いて  $ZT = S^2 T / \rho \kappa$  で定義される.



したがって、大きな S(V/K) と低い  $\rho(\Omega m)$  および低い  $\kappa(W/Km) = \kappa_c(電荷キャリアの寄与) + \kappa_L(格子の寄与) をもつ物$ 質が良い熱電変換材料となる.このような材料で作った発電モジュールは大きな起電力と低い内部抵抗をもち、かつ温度差を維持し易い.

自動車や工業炉の未利用熱を電力として効率的に回収する には、500 K~800 K の温度範囲で高い性能をもつ熱電変換 材料が必要である.それに該当するテルル化鉛 PbTe<sup>(1)-(3)</sup> は他の追従を許さない高い性能を示すが、毒性をもつ Pb と 稀少な Te の化合物であるために広範な実用化には至ってい ない.一方、低毒性の元素からなる充填スクッテルダイト化 合物 R(Fe, Co)<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>(R:アルカリ土類金属元素および希土 類金属元素)<sup>(1)(4)</sup>とハーフホイスラー化合物 MNiSn, MCoSb (M: Ti, Zr, Hf)<sup>(5)</sup>は良い性能と優れた熱的・機械的安定性 を併せもつ有望な材料であり、発電用モジュールの開発が進 んでいる.また、クラスレート化合物 Ba<sub>8</sub>Ga<sub>16</sub>Sn<sub>30</sub> は 500 K ~600 K という比較的低温で高い性能を有する材料であり、 モジュールが試作されている<sup>(6)(7)</sup>.さらなる大規模応用のた

Keywords: thermoelectrics, thermoelectric materials, thermoelectric generator, p-type, sulfide, mineral, tetrahedrite, colusite 2015年2月20日受理[doi:10.2320/materia.54.335]

<sup>\*</sup> 広島大学大学院先端物質科学研究科 1) 助教 2) 教授(〒739-8530 東広島市鏡山 1-3-1)

<sup>\*\*</sup> 産業技術総合研究所省エネルギー研究部門 1)主任研究員 2)研究グループ長

Synthetic Copper-based Sulfide Minerals as Advanced Thermoelectric Materials and the Modularization for Power Generation; Koichiro Suekuni\*, Toshiro Takabatake\*, Michihiro Ohta\*\* and Atsushi Yamamoto\*\*(\*Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima. \*\*Research Institute for Energy Conservation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba)

めには,稀少元素の希土類金属元素,Zr,Hf,Sb,Gaを地殻 埋蔵量が豊富な元素で置き換える必要があり,さらに材料の 軽量化も図る必要がある.

以上の背景から,低毒性で豊富な元素からなる高性能材料 の開発が待ち望まれている.しかし、これまでに報告された 環境調和型材料である酸化物<sup>(8)</sup>, 珪化物<sup>(9)</sup>, 硫化物系材 料<sup>(10)</sup>の中で、上記の温度域で PbTe に迫る高い性能を示す 材料は少ない. その原因は, 500 K~800 K で大きな S を示 す物質が(縮退)半導体に限られるためである.また、以下に 述べる理由で、熱電パラメータの最適化が容易ではないから である. $S \ge \rho$ および  $\kappa_c$ はいずれもキャリア密度 nの関数 (縮退電子系では $S \propto n^{-2/3}$ ,  $\rho \propto n^{-1}$ ,  $\kappa_c \propto \rho^{-1} \propto n$ )であるた め、出力因子  $S^2/\rho$  を大きく保持し、一方で  $\kappa_c$  を低くするよ うに n を最適化しなければならない. また, KL を低減させ ようとして結晶格子に乱れを導入すると、キャリアの散乱確 率の増大によるρの増加や意図しないキャリアドープが起 こる.このように、熱電パラメータには「あちらが立てばこ ちらが立たず」という三すくみの関係があるため、従来材料 の性能向上や新規材料の探索は難しい.

そこで我々は、以下に示すように、大きな $S^2/\rho$ と低い $\kappa_L$ を有する物質を探し、そのキャリアの密度を最適化するという方法を採った.まず、低毒性で豊富な元素のCu(銅)とS(硫黄)を含む $Cu_{1.8}$ Sと $Cu_{2.1}Zn_{0.9}SnS_4$ がP型の比較的大きな $S^2/\rho$ を示す<sup>(11)(12)</sup>ことに注目し、CuとSを主成分とする硫化銅鉱物を研究対象に選んだ.次に、豊富な鉱物データベースから以下①から④に示す特徴をもつ物質を選び出した.

①高対称な結晶構造(立方晶構造)を有する,②単位格子中の 原子数が多い,③構造が複雑である,④構造中に大振幅振動 する原子がある.なぜなら,特徴の①は,電子バンドの縮重 度を高めて $S^2/\rho$ を大きくし,②③④は音響フォノンの散乱 確率を高めて $\kappa_L$ を低くするからである<sup>(13)</sup>.最後に,Cuを 3d 遷移金属元素で置換して,キャリア密度の調節を図っ た.このように,我々は元素種と結晶構造の特徴を考慮する ことで,次に紹介する優れた性能を示す熱電変換材料を得 た.さらに,我々は,その新規材料を用いたモジュールの作 製を行っているので,その進捗も紹介したい.

### 2. 高い性能を示す硫化銅鉱物系熱電変換材料

硫化銅鉱物には、二元で簡単な化学組成の銅藍 CuS や輝 銅鉱 Cu<sub>2</sub>S から三元以上の複雑組成の物質まで、多種多様な ものがある.その中でも、我々が優れた熱電変換性能を見出 した複雑組成の安四面銅鉱(テトラヘドライト)<sup>(14)(15)</sup>とコル ーサ鉱(コルーサイト)<sup>(16)</sup>を本稿では紹介する.また、従来 の熱電変換材料と比較して、これらの硫化銅鉱物系材料の優 位性を議論する.

#### (1) テトラヘドライト Cu<sub>12-x</sub>Tr<sub>x</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>13</sub>(Tr: 3d 遷移金属)

テトラヘドライトは,58個もの原子からなる体心立方構 造をもつ.図2(a)に示すように,CuはSが作る三角形面内 および四面体中に位置し,前者のCuは面直方向に大振幅振 動している<sup>(15)</sup>.四面体中の6個のCuのうち,2個までは Tr原子で置き換えることができる.

多結晶試料は,化学量論比の原料を石英管中で反応させて 合成した.作製時の最高温度 903 K~1003 K で硫黄 S は高 い蒸気圧を示すが,他の元素とよく反応して殆ど残存しなか った.この試料を均一化するために,773 K で焼鈍処理を施 した.物性測定および後述のモジュール化に必要な高密度多 結晶試料は,加圧焼結(ホットプレス焼結)法で作製した.

無置換系 Cu<sub>12</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>13</sub>の 300 K での $\rho$ は 1×10<sup>-5</sup> Ωm, S は + 80  $\mu$ V/K (P 型) である.後者の値は Cu<sub>1.8</sub>S (+ 20  $\mu$ V/K)<sup>(11)</sup> と比較して4倍も大きい.この優れた電気的特性は Cu-3d と S-3p の混成軌道からなる価電子帯に由来すること が,第一原理計算によって示された<sup>(17)(18)</sup>.これに加えて, 前述した特徴①(高対称な結晶構造)が低い $\rho$ と高いSの共 存に寄与していると考えられる.また,300 K での $\kappa$ =1.3 W/Km は,低熱伝導率材料の典型であるシリカガラス並み に低い.これは,その格子成分  $\kappa_L$ が極端に低い(0.5 W/Km 以下)ことに起因しており, $\kappa_L$ が低いのは結晶構造が上述の 特徴の②③④を有するためである可能性が高い.このように, Cu<sub>12</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>13</sub> は熱電変換材料に適した電子構造と本質的に低 い $\kappa_L$ を併せ持ち,さらに,Sの値が温度上昇と共に増加す るため,700 K 付近で比較的高い ZT を示す.

Cu<sub>12</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>13</sub>の電子構造は半導体的であり、価電子帯と伝 導帯の間には1.2 eV のエネルギーギャップがある<sup>(17)(18)</sup>. それにも拘らず上述の金属的(縮退半導体的)な電気伝導が現 れるのは、Cu<sub>12</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>13</sub>が化学式当たり2個のホールをもつ ためである. 我々はまず, CuをTr(=Mn, Fe, Co, Ni, Zn) で固溶限界まで置換すると,いずれの置換に対してもホール キャリア密度が減少する(電子がドープされる)ことを明らか にした<sup>(14)</sup>.次に、 $Cu_{12-x}Ni_xSb_4S_{13}$ において置換量 x とキャ リア密度を細かく調節することで、x=1.5のときに665K でのZTが最大値0.7に達することを見出した(図3)<sup>(15)</sup>.こ の値はP型硫化物の中で最も高いだけではなく,従来材料 の PbTe に匹敵する. 我々の報告と同じ頃, 米国ミシガン州 立大のグループは, Tr<sub>x</sub>=Zn<sub>0.5</sub>のZTが720Kにおいて0.95 に達すると発表した(17).その後、複数のグループにより、 テトラヘドライトが約700KでZT~0.8を示すことが再現 良く確かめられた(19)-(21). さらに最近,置換元素とその組 成を微調整することで、ZT=1.0を超えることが報告され







図3 テトラヘドライト  $Cu_{10.5}Ni_{1.5}Sb_4S_{13}^{(15)}(\bullet)$ ,  $Cu_{11.5}Zn_{0.5}Sb_4S_{13}^{(17)}(\bullet)$ , コルーサイト  $Cu_{26}V_2$   $Ge_6S_{32}^{(16)}(\Box)$ ,  $Cu_{26}V_2Sn_6S_{32}^{(16)}(\bigcirc)$ , 硫化銅鉱 物系材料  $Cu_{1.8}S + Cu_{1.96}S^{(11)}$ ,  $Cu_{2.1}Zn_{0.9}$   $SnS_4^{(12)}$ , および P型の従来材料<sup>(1)</sup>(破線)の無次 元性能指数 ZT の温度依存性.

た<sup>(22)</sup>. 2012年の発見からわずか3年で,多くの材料において壁となっている *ZT*=1.0 を超えたこの事実は,テトラへドライトが非常に有望な熱電変換材料であることを示している.

#### (2) $\exists \mu - \forall i \models Cu_{26}V_2M_6S_{32}(M = Ge, Sn)$

コルーサイトは,66個もの原子からなる単純立方構造を もつ.図2(b)に示すように,Cu,VおよびM(=Ge,Sn) はいずれも,Sが作る四面体の中に位置する.すべてのCu が四配位構造をとるという点は,テトラヘドライトと異なる.

試料の作製方法は前述のテトラヘドライトの場合とほとん ど同じであるが、Vが他の元素と反応しにくいため、作製 の最高温度を1273 K~1373 Kまで高めた.物性測定のため の高密度多結晶試料は、ホットプレス焼結法で作製した.

 $Cu_{26}V_2M_6S_{32}$ の $\rho$ とSは350K以上で温度上昇に伴い増 大し,663Kにおいてそれぞれ7~10×10<sup>-5</sup>Ωmと+210  $\mu$ V/Kとなる.この比較的優れた電気的特性は、テトラヘド ライトCu<sub>12</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>13</sub>と同様に、Cu-3dとS-3pの混成軌道か らなる価電子帯に由来する<sup>(16)</sup>.さらに、 $\kappa_L$ の値が0.5W/ Kmと低いために、663KでのZTはM=Snのとき0.56、 Geのとき0.73に達する(図3).コルーサイトの類似物質で あるサルバナイトCu<sub>3</sub>VS<sub>4</sub>(8つの原子からなる単純立方格子 をもつ)を作製して $\kappa_L$ を評価した結果、コルーサイトの 300 Kでの $\kappa_L$ はサルバナイトの10分の1程度しかないことが判 った.この比較から、コルーサイトの低い $\kappa_L$ は結晶構造に 関する前述の特徴②と③に起因すると結論付けた<sup>(16)</sup>.この ように、コルーサイトの $\kappa_L$ は本質的に低いので、元素置換 によりキャリア密度を調節することで、さらに高い性能が得 られると期待される.

#### (3) テトラヘドライトとコルーサイトの類似点

上述の2つの人工硫化銅鉱物は,優れた環境調和性と熱

電変換性能を併せもつ. また,主成分であるSが軽元素で あるために試料密度は $4.4 \sim 5.0 \text{ Mg/m}^3$ であり,この値は PbTe,スクッテルダイト CeFe<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>,ハーフホイスラー ZrNiSn の $\sim 8 \text{ Mg/m}^3$ の約6割に留まる.これらに加えて, 構成元素が比較的安価であることも,実用化を検討する際に は大きなメリットとなる.

テトラヘドライトとコルーサイトに共通する優れた電気的 特性は Cu-3d と S-3p の混成軌道からなる価電子帯に由来 することが、第一原理計算により示された<sup>(16)-(18)</sup>.高い S 値を発現するメカニズムが価電子帯の特徴から説明付けられ れば、材料開発の助けになるであろう.また、低い $\kappa_L$ と複 雑な結晶構造との関係を明らかにするために、フォノン構造 の情報を得るための実験が進行中である.それによって、低 い $\kappa_L$ をもたらすフォノン構造の特徴を明らかにしたい.

#### 3. テトラヘドライト P 型単一素子の発電特性

上記の基礎研究の成果を実用化に結び付けるために,発電 モジュールの試作を実施している.これまでに,テトラヘド ライト  $Cu_{11.0}Sb_4S_{13}$ からなる P 型単一素子(4.4 mm × 4.4 mm × 10.5 mm)の発電能力を小型熱電発電モジュール評 価装置(Mini-PEM,アドバンス理工株式会社製)(図 4(a)) を用いて評価した.さらに,有限要素法(COMSOL Multiphysics)により熱電物性値から発電特性を計算し,実際の 発電特性と比較して課題を抽出した.

以下に,評価方法の概略を記す<sup>(23)</sup>.まず,一軸加圧(約 50 N)により素子を電極材(In ベース合金)と熱浴(Cu ブロッ ク)で挟み込んだ.次に,低温熱浴の温度  $T_c$ を水冷により 約 300 K に保持しながら,高温端を任意の温度  $T_h$  まで加熱 した.温度安定を待った後に負荷電流 I を変化させ,電圧 V を計測し,発電量  $P_{out}(=IV)$ を算出した.また,冷却水の 流量と受熱による温度上昇から熱流量  $Q_{out}$ を推定し,試料 や電極などからの輻射による熱損失を考慮して, $Q_{out}$ の値を 補正した.最後に,得られたデータから変換効率  $\eta = P_{out}/(P_{out}+Q_{out})$ を求めた.ここで, $(P_{out}+Q_{out})$ は入力の熱流量  $Q_{in}$ に相当する.

図4(b)と(c)にそれぞれ,最大出力 $P_{\text{max}}$ および最大変換 効率 $\eta_{\text{max}}$ と $T_{\text{h}}$ の関係の実測値と計算値を示す。実際の測定 は466 K まで実施した。それ以上の温度になると電極材と テトラヘドライトが反応し,界面に高抵抗相が出現して,発 電特性を評価できなくなった。 $T_{\text{h}}$ =466 K での実測値( $P_{\text{max}}$ =4.3 mW, $\eta_{\text{max}}$ =1.5%)は、いずれも計算値( $P_{\text{max}}$ =10 mW,  $\eta_{\text{max}}$ =3.6%)の4割程度であった。ここで, $T_{\text{h}}$ =466 K にお ける開放電圧  $V_0$ (I=0 の時の V)の実測値 0.020 V に対し て,計算値が 0.021 V,同様に $T_{\text{h}}$ =466 K,I=0のときの  $Q_{\text{out}}$ の実測値 0.28 W に対して計算値が 0.24 W となり,そ れぞれで実測値と計算値の間に大きな違いは見出せなかっ た。その一方で, $T_{\text{h}}$ =466 K のときのV-Iの傾き(すなわち 抵抗)の実測値 24 mΩ は,計算値 10 mΩ の2 倍程度であっ た。したがって,本評価における $P_{\text{max}}$ と $\eta_{\text{max}}$ の実測値が計 算値より低いのは,電極材とテトラヘドライトの界面抵抗が



高いためであると結論付けられる.

現在、上記の課題を克服するために、電極材の選定および 拡散防止層の作製を実施しており、これにより界面抵抗を小 さくできれば、今回の素子寸法の場合、図4(b)と(c)に示す 通り、 $T_{\rm h}$ =673 K で $P_{\rm max}$ =61 mW(出力密度にして 3.2 kW/  $m^2$ )および  $\eta_{max} = 7.8\%$ が得られると期待される.

## まとめと今後の展望

我々は元素種と結晶構造に着目することで、優れた環境調 和性と高い熱電変換性能を併せもつP型硫化銅鉱物系材料 を開発した. 自然界に広く存在するこの物質群は作製とハン ドリングが容易であるため、2012年の第一報から3年間で 多数の追試論文が発表され、我々もモジュール化に向けた研 究まで進めることができた. 最近, 材料の開発競争が過熱し ているため、我々は性能の最適化、N型物質の開発、電極 材料の選定と接合状態の改善を行い、世界に先駆けて鉱物系 材料からなる熱電発電モジュールの作製を急いでいる. 欧米 では既に、様々な熱電変換材料のモジュール化や実装化に向 けた取り組みが広範に行われている. それらに先行して我々 が開発した材料を実用化するために、より多くの方と協力で きれば幸いである.

モジュール開発において、シミュレーションを実施して頂 いた HU Xiaokai 博士と、モジュールの作製と評価を補助し て頂いた相原誠氏(両名とも産業技術総合研究所)に感謝しま す.本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金 (No.22840021, No.25420699, No.26820296), 熱・電気エネ ルギー技術財団、中国電力技術研究財団、および日米等エネ ルギー技術開発協力事業(経済産業省)からの支援を頂いて実 施されました.

文 献

- (1) G. J. Snyder and E. S. Toberer: Nature Mater., 7(2008), 105-114.
- (2)M. Ohta, K. Biswas, S. H. Lo, J. Q. He, D. Y. Chung, V. P. Dravid and M. G. Kanatzidis: Adv. Energy Mater., 2(2012), 1117 - 1123
- (3) K. Biswas, J. Q. He, I. D. Blum, C. I. Wu, T. P. Hogan, D. N. Seidman, V. P. Dravid and M. G. Kanatzidis: Nature, 489 (2012), 414-418.
- (4) J. R. Salvador, J. Y. Cho, Z. Ye, J. E. Moczygemba, A. J. Thompson, J. W. Sharp, J. D. Koenig, R. Maloney, T. Thompson, J. Sakamoto, H. Wang and A. A. Wereszczak: Phys. Chem. Chem. Phys., 16(2014), 12510-12520.
- (5) W. Xie, A. Weidenkaff, X. Tang, Q. Zhang, J. Poon and T. M. Tritt: Nanomaterials, 2(2012), 379-412.
- (6) 高畠敏郎:工業材料,日刊工業新聞社,62(2014),43-47.
- (7) T. Takabatake, K. Suekuni, T. Nakayama and E. Kaneshita: Rev. Mod. Phys., 86(2014), 669-716.
- (8) 寺崎一郎, 大瀧倫卓, 本橋輝樹, 宮崎 譲, 野原 実, 黒木 和彦:熱電変換技術ハンドブック,梶川武信監修,エヌ・テ ィー・エス社, (2008), 201-248.
- (9)飯田 努:熱電変換技術ハンドブック,梶川武信監修,エ ヌ・ティー・エス社, (2008), 160-169.
- (10) 太田道広:金属, 83(2013), 847-854.
- (11) Z. H. Ge, B. P. Zhang, Y. X. Chen, Z. X. Yu, Y. Liu and J. F. Li: Chem. Commun., 47 (2011), 12697-12699.
- (12) M. L. Liu, F. Q. Huang, L. D. Chen and I. W. Chen: Appl. Phys. Lett., 94(2009), 202103/1-3.
- (13) F. J. DiSalvo: Science, 285(1999), 703-706.
- (14) K. Suekuni, K. Tsuruta, T. Ariga and M. Koyano: Appl. Phys. Express, 5(2012), 051201.
- (15) K. Suekuni, K. Tsuruta, M. Kunii, H. Nishiate, E. Nishibori, S. Maki, M. Ohta, A. Yamamoto and M. Koyano: J. Appl. Phys., **113**(2013). 043712.
- (16) K. Suekuni, F. S. Kim, H. Nishiate, M. Ohta, H. I. Tanaka and T. Takabatake: Appl. Phys. Lett., 105 (2014), 132107.
- (17) X. Lu, D. T. Morelli, Y. Xia, F. Zhou, V. Ozolins, H. Chi, X. Zhou and C. Uher: Adv. Energy Mater., 3(2013), 342-348.
- (18) K. Suekuni, Y. Tomizawa, T. Ozaki and M. Koyano: J. Appl. Phys., 115(2014), 143702.
- (19) X. Lu and D. T. Morelli: Phys. Chem. Chem. Phys., 15(2013), 5762-5766.
- (20) R. Chetty, P. Kumar, D. S., G. Rogl, P. Rogl, E. Bauer, H. Michor, S. Suwas, S. Puchegger, G. Giester and R. C. Mallik: Phys. Chem. Chem. Phys., 17 (2015), 1716-1727.
- (21) T. Barbier, P. Lemoine, S. Gascoin, O. I. Lebedev, A. Kaltzoglou, P. Vaqueiro, A. V. Powell, R. I. Smith and E. Guilmeau: J. Alloys Compd., 634(2015), 253-262.
- (22) X. Lu, D. T. Morelli, Y. Xia and V. Ozolins: Chem. Mater., 27 (2015), 408-413.
- (23) X. K. Hu, A. Yamamoto, M. Ohta and H. Nishiate: Rev. Sci. Instrum., 86(2015), 045103.

#### \*\*\*\*\* 末國晃一郎

- 広島大学大学院先端物質科学研究科博士課程後期修了 2010年3月
- 北陸先端科学技術大学院大学 2010年4月 マテリアルサイエンス研究科 助教
- 2013年3月-現職
- 専門分野:熱電変換,物性物理

◎高性能熱電変換物質の探索と熱電・磁気物性の実験的研究に従事. \*\*\*\*\*

