1. 構造と機能

大きな熱電能をもつミスフィット層状化合物
(Ca₂CoO₃)_pCoO₂の変調構造

東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 宮崎 譲

Yuzuru MIYAZAKI: Modulated Structure of the Misfit Layer Thermoelectric Compound
(Ca₂CoO₃)_pCoO₂

Crystal structure of the thermoelectric compound known as "Ca₃Co₄O₉" has been determined using a 3 + 1 dimensional superspace group approach. The cobaltite has been revealed to be a misfit layer compound which consists of two monoclinic subsystems of [CoO₂] and [Ca₂CoO₃]. The [CoO₂] subsystem has a CdI₂-type triangular lattice of cobalt, while the [Ca₂CoO₃] subsystem comprises a three-layered ordered rock salt-type slab. Since the both subsystems have incommensurate *b*-axis lengths, the structure formula is expressed as [Ca₂CoO₃]_pCoO₂, where $p = b_{\text{CoO}_2}/b_{\text{Ca}_2\text{CoO}_3}$. Due to the potential interaction between the subsystems, atomic displacive modulation is observed for each atom. The most significant modulation has been found in the Co-O layer of the [Ca₂CoO₃] subsystem.

1. はじめに

1997年にTerasakiら¹⁾によって発見された γ -Na₄CoO₂は、Bi₂Te₃系実用材料に匹敵する熱電特性を示し、しかも酸化物の特長である耐熱性、耐酸化性を併せもつことから、高温で使用される熱電発電材料としての期待が高まっている。現在わが国では、火力発電や自動車の排気系で発生する熱資源の大部分をそのまま大気に放出しているが、これらの廃熱を熱電発電の熱源として有効に使うことができれば、大幅な省エネルギーに繋がることは間違いない。 γ -Na₄CoO₂の発見に刺激を受け、国内外で力学的な物質探索が行われた結果、Bi-Sr-Co-O系²⁾やCa-Co-O系³⁾などにおいても優れた熱電特性を示す化合物が相次いで発見されてきた。一般に熱電材料は性能指数 $Z = S^2/\rho\kappa$ (S は熱電能、 ρ は抵抗率、 κ は熱伝導率)で評価され、これに絶対温度 T を乗じた無次元性能指数 ZT が1を超えることが実用上の目安とされている。Ca-Co-O系では、Caサイトを一部BiとSrで置換することにより、高温で ZT が1を超えたとの報告がなされており、⁴⁾実用化への期待が一層高まっている。

われわれは、 γ -Na₄CoO₂に代わり得る新物質を探索する過程で、“Ca₃Co₄O₉”として知られる化合物が大きな熱電能と金属的な電気抵抗率の温度変化を示すことを見出した。⁵⁾また結晶構造解析の結果、この化合物がミスフィット層状構造と呼ばれる、2種類の部分構造からなる複合結晶であることを明らかにした(ほぼ同時期に、Massetら⁶⁾も同酸化物の単結晶試料の熱電特性と電顕観察に関する同様な結果を報告している)。本稿では、この化合物の結

晶構造をわれわれが行った解析過程に沿って紹介する。なお、コバルト系酸化物熱電変換材料の物理的な側面に関しては、本特集号の寺崎氏の記事⁷⁾(および参考文献)を参照していただきたい。また、複合結晶とその解析法については、小野田氏による本誌の解説記事⁸⁾に詳細に書かれているので、興味のある方はそちらも参照されることをお勧めする。

2. 単相試料の合成

“Ca₃Co₄O₉”相は、古い状態図にはCa₉Co₁₂O₂₈とも記述されており、⁹⁾すでに30年以上も前からその存在は知られていた。しかし、空气中926℃以下で安定に存在できるという事実¹⁰⁾以外、構造や物性に関する研究は報告されていなかった。この化合物の物性に関する記述は、室温以上における熱電特性を研究したLiら¹¹⁾による報告が最初のものであろう。われわれは上述のように、Terasakiらの報告に刺激を受け、独自に“Ca₃Co₄O₉”相に関する研究を進めていた。そして、観察された大きな熱電能と金属的伝導性⁵⁾の起源を考察するために、結晶構造解析の必要性が強く感じられた。さらに、定比で表されていた従来の組成式にも疑問を抱いたので、改めて単相試料の組成から調べていくことにした。

CaCO₃ (99.9%)とCo₃O₄ (99.95%)を出発原料に用いて、通常の固相反応法による焼成実験を行った。酸素気流中、920℃で12時間の焼成・炉冷・再混合を3回繰り返して単相組成を調べたところ、Ca:Co比が3.00:3.92 (2)以外(括弧内の数字は標準偏差を表す)では、粉末X線回折パターンに第2相が現れた。また、Ar/H₂気流中で熱重量

測定を行って求められた酸素量は9.36 (2)であった。これらのことから、この化合物の組成式は“ $\text{Ca}_3\text{Co}_{3.92(2)}\text{O}_{9.36(2)}$ ”であり、従来信じられてきた組成式とはまったく異なることが明らかになった。

このように定比で表せない組成を有する化合物は、いったいどのような結晶構造をしているのだろうか。状態図⁹⁾によると、この化合物は926℃より高い温度では $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ と CoO に分解するため、融液からの単結晶育成は困難であると考えられた(現在では SrCl_2 などの塩化物をフラックスとすれば5 mm²角程度の結晶が育成できることが知られている¹⁰⁾)。そこで空間群を調べるために、多結晶試料を用いて電子回折実験を行った。

3. 対称性

図1に、最も頻繁に観察されたこの化合物の電子回折パターンを示す。結晶粒はアスペクト比の大きい平板状であることから、この化合物は異方性の大きな、おそらく層状の結晶構造を有し、図のパターンはこの化合物の積層方向に垂直な面のパターンである可能性が高い。回折パターンは、四角いスポットと六角形のスポットが混在したように見えるが、強いスポットを注意深く見ると白い波線で描いたような2種類の底心対称性を有する四角いパターンからなることがわかる。この2種類の格子は、 a 方向には同一の周期をもつが、 b 方向には、互いに割り切れない周期をもっていることが明らかになった(別の回折パターンから、2種類の格子は c 方向にも同一の周期をもつ単斜晶であることがわかった)。このような周期の異なる複数の部分構造からなる結晶は一般に「複合結晶」と呼ばれている。

図1 $[0010]$ 入射の $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$ の電子回折パターン。(Electron diffraction pattern of $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$ taken with incident beam parallel to $[0010]$.)

この化合物のような複合結晶の場合、回折パターンの指数づけには、異なる b 軸長に対応して、 hkl に加えて m という指数を導入する必要がある。つまり、逆空間で大きな四角形(第1部分構造と呼ぶことにする)に対応する格子の指数を hkl で表し、小さな四角(第2部分構造)に対応する格子の指数を hml で表す。そして、 $hkml$ という四次元表示をすることで、すべてのスポットに満遍なく指数をつけることが可能となる。図は a^*-b^* 面のパターンなので $l=0$ であるから、第1部分構造に対応する指数は $hk00$ で表され、第2部分構造に対応する指数は $h00m$ で表される。

逆格子空間での回折スポットの間隔より、格子定数は第1部分構造に対して、 $a \sim 4.83 \text{ \AA}$, $b_1 \sim 2.82 \text{ \AA}$, $c \sim 10.84 \text{ \AA}$, $\beta \sim 98.1^\circ$, 第2部分構造に対して、 $a \sim 4.83 \text{ \AA}$, $b_2 \sim 4.56 \text{ \AA}$, $c \sim 10.84 \text{ \AA}$, $\beta \sim 98.1^\circ$ と見積もられる。消滅則は、 $hk0$ 反射に対して $h+k=2n$, $h0lm$ 反射に対して $h+m=2n$ であり、これを四次元超空間の表記で表すと、 $hkml$ 反射に対して $h+k+m=2n$ となる。したがって、両部分構造はいずれも底心単斜晶で、各々の空間群は $C2/m$, $C2$, Cm のいずれかであると考えられる。また、 b 軸方向に非整合周期 p が存在するため、変調ベクトルは $\mathbf{q} = \mathbf{a}^* + p\mathbf{b}_1^* \sim \mathbf{a}^* + 0.62\mathbf{b}_1^*$ で表される(p は b 軸長比に相当する)。

4. 基本構造の解析

Rietveld解析で未知の構造を扱う場合、正しい構造モデルをいかに構築できるかが構造解析の正否を左右する。本化合物の場合、高分解能電顕像と格子定数を基にして、第1部分構造が CdI_2 型の CoO_2 層からなり、第2部分構造が3層の岩塩型 CaO-CoO-CaO 層からなる構造モデルを構築した。この場合、構造式は $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$ ($p \sim 0.62$)となり、組成分析の結果ともよく対応している。

試行錯誤の末、最終的に表1に示したモデルを採用した。このモデルでは CoO_2 部分構造が $C2/m$ の対称性を有し、 Ca_2CoO_3 部分構造が $C2_1/m$ の対称性を有している。 Ca_2CoO_3 部分構造は、岩塩型配置のみを取り出してみると $C2/m$ の対称性を有するが、単位胞中では、 Ca が CoO_2 部分構造の酸素と固体化学的に妥当な結合をもつように、

表1 $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$ の初期構造モデル。(Initial structure model of $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$.)

	x	y	z
Subsystem 1 : CoO_2			
Co1	0	0	0
O1	0.360	0	0.097
Subsystem 2 : Ca_2CoO_3			
Ca	0.346	0	0.710
Co2	3/4	0	1/2
O2	1/4	0	1/2
O3	0.750	0	0.330

図2 精密化された $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$ の基本構造. (Refined fundamental structure of $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$.)

Ca_2CoO_3 部分構造全体を a 軸方向に $1/4$ シフトさせている。これを、超空間群で表すと $C2/m(1p0)s0$ となる。対称操作は基本ベクトル $\mathbf{a}^*$, $\mathbf{b}_1^*$, $\mathbf{c}^*$, $\mathbf{b}_2^*$ に対応する座標を用いて x_1, x_2, x_3, x_4 ; $-x_1, x_2, -x_3, 1/2 + x_4$; $-x_1, -x_2, -x_3, 1/2 - x_4$; $x_1, -x_2, x_3, -x_4$ および、これらに $(0, 0, 0)$ と $(1/2, 1/2, 0, 1/2)$ の並進操作を加えたものである。実際の Rietveld 解析には、山本氏が作成したソフトウェア PREMOS91 を用いた。¹²⁾

原研 JRR-3M に設置された高分解能中性子回折装置 HRPD により、室温において測定された粉末中性子回折データを用いて基本構造の解析を行ったところ、信頼度因子は $R_{\text{WP}} \sim 12\%$ となり、構造モデルの信頼性がきわめて高いことがわかった。解析の結果明らかになった $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$ の基本構造を図2に示す。 CdI_2 型の CoO_2 層は、 $\gamma\text{-Na}_x\text{CoO}_2$ ($x \sim 0.7$) に見られる伝導層と同一の構造単位である。岩塩型の $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]$ 層では、Ca と Co の相互置換は認められず、 CaO-CoO-CaO の層を保ったまま積層していることが確認された。両部分構造は単斜晶の a, c 軸を共有しているが、 b 軸方向にはそれぞれ独自の周期を保っている。このような層状構造を有する複合結晶は、特にミスフィット層状構造と呼ばれており、 $[\text{PbS}]_p\text{VS}_2$ ¹³⁾ のようなカルコゲナイド系において比較的頻繁に見られる構造である。

5. 変調構造の解析

一般に複合結晶においては、異なる周期をもつ部分構造間のポテンシャル相互作用のため、原子位置に変位変調が生じる。複合結晶の構造解析では、この変位変調を正しく解析することが重要なポイントとなる。変調関数としては、 $\sin$ 項と $\cos$ 項の和で表される複素 Fourier 級数の二次の項までを採用して、各原子に対してその振幅 A_i

($i = 0, 1, 2$), B_i ($i = 1, 2$) の精密化を行った (A_0 項は基本構造に対応する)。また、原子の熱振動パラメータは等方的であると仮定し、解析では $1.0 \text{ \AA}^2$ に固定した。

二次までの変位変調を考慮することにより、 R_{WP} は 8.7% まで低下した。最終的な解析結果を図3に、また精密化された構造パラメータを表2に示す。解析結果のパターンは、強いピークで一致が良くないものもある。これは、試料が積層不整によるピークの広幅化を含んでおり、場合によっては半値幅が3倍程度も異なるピークを同一のプロファイル関数で近似していることに起因するものであり、今後は、積層不整の適切な考慮を含めた解析を行う必要がある。

表2をみると $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]$ 部分構造内の原子に大きな変位変調が生じていることが推察される。この部分構造内の Co-O 結合距離を内部座標 t に対してプロットすると図4のようになる。ここに t は $-px_2 + x_4$ で定義され、四次元超空間における原子座標に相当する。⁸⁾ CoO_2 は酸素により6配位されており、このうち水平面内の4本の結合 (a), (b), (d), (f) は O_2 、上下の結合 (c), (e) は O_3 に対するものである。6本の結合は、いずれも $p = 0.6181$ を周期として距離が変動していることがわかる。2本の $\text{CoO}_2\text{-O}_3$ 結合は、ほかの4本の結合に比べてやや短く、 $1.6 \text{ \AA}$ から $2.1 \text{ \AA}$ の範囲で変化している。これに対し、面内の4本の $\text{CoO}_2\text{-O}_2$ 結合は、(d), (f) が比較的短めの $2.0 \text{ \AA}$ から $2.6 \text{ \AA}$ の間で変化し、(a), (b) は $2.2 \text{ \AA}$ から $2.7 \text{ \AA}$ の間で変化している。 $t = 0$ においては、 $\text{CoO}_2\text{-O}$ 結合は、約 $2.0 \text{ \AA}$ の4本と、 $1.7 \text{ \AA}$ および $2.7 \text{ \AA}$ の各1本からなる歪んだ八面体を形成する。 t の変化により、 CoO_6 八面体は種々の形に歪みながら結晶を構成していることがわかる。なおこの化合物は、アニール条件によって $\text{CoO}_2\text{-O}$ 面内に4%程度の酸素欠損を導入することが可能である。欠損量がわずかなので、構造解析

図3 粉末中性子回折データを用いた $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$ の Rietveld 解析結果. (Rietveld refinement pattern of $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$.)
 + は実測強度, 実線は計算強度, 2 段の縦線は, 上が基本反射, 下が衛星反射による Bragg 反射位置, 下の曲線は
 実測強度と計算強度の差.

表2 精密化された $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$ の変調構造の構造パラメータ. (Refined structure parameters of $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$.)

	A_0	A_1	B_1	A_2	B_2
Subsystem 1 : CoO_2					
Co1					
$x (=x_1)$	0	-0.001 (1)	0	0	0
$y (=x_2)$	0	0	0	0	-0.022 (12)
$z (=x_3)$	0	0.000 (1)	0	0	0
O1					
x	0.003 (1)	-0.005 (3)	0	0.004 (3)	0
y	0	0	0.004 (8)	0	0.006 (4)
z	-0.004 (1)	-0.003 (1)	0	0.002 (1)	0
Subsystem 2 : Ca_2CoO_3					
Ca					
$x (=x_1)$	-0.027 (1)	-0.008 (6)	0	-0.010 (11)	0
$y (=x_4)$	0	0	0.026 (6)	0	0.010 (7)
$z (=x_3)$	0.013 (1)	0.012 (3)	0	0.004 (6)	0
Co2					
x	0	-0.068 (9)	0	0	0
y	0	0	0	0	-0.073 (11)
z	0	-0.001 (1)	0	0	0
O2					
x	0	-0.119 (5)	0	0	0
y	0	0	0	0	0.079 (5)
z	0.000 (2)	0	0	0	0
O3					
x	-0.053 (2)	-0.005 (4)	0	0.001 (1)	0
y	0	0	-0.022 (4)	0	-0.002 (7)
z	0.005 (1)	-0.014 (2)	0	-0.011 (3)	0

$a=4.8320(3) \text{ \AA}$, $b_1=2.8217(2) \text{ \AA}$, $c=10.8431(7) \text{ \AA}$, $b_2=4.5652(2) \text{ \AA}$, $\beta=98.14(1)^\circ$, $p=0.61808(7)$.

The isotropic thermal displacement parameter of each atom was fixed at 1.0.

により欠損サイトを特定することは困難であるが、酸素欠損により変位変調の様子が変化することは容易に想像できる。

次に、Ca-O 結合について見てみる。図5は同様にして

$z \sim 0.7$ の位置にある Ca に配位する酸素との結合距離を t' に対してプロットしたものである。Ca は $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]$ 部分構造内の 5 個の酸素 (下図 (i) ~ (v)) と結合をもつほかに、 $[\text{CoO}_2]$ 部分構造内の 3 個の酸素 (上図 (vi) ~ (viii)) と

図4 $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]$ 部分構造内の Co-O 結合距離の変化. (Co-O distances in the $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]$ subsystem plotted against t' .) 内部座標 t' は $-px_2 + x_4$ で定義される. 詳細は本文参照.

図6 $[\text{CoO}_2]$ 部分構造内の Co-O 結合距離およびコバルトイオンのボンドバレンスサムの変化. (Co-O distances and BVS in the $[\text{CoO}_2]$ subsystem plotted against t' .)

図5 Ca-O 結合距離の変化. (Ca-O distances plotted against t' .) 上図は Ca と $[\text{CoO}_2]$ 部分構造内の O との距離. 下図は Ca と $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]$ 部分構造内の O との距離.

結合をもつ. このうち, $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]$ 部分構造内の酸素とは, Co_2 の場合と同様に周期 p で結合距離が変化する. これら 5 本の Ca-O 結合距離は, 典型的なイオン結合による Ca-O 距離 2.3 ~ 2.4 Å とほぼ一致している. 一方, 異なる部分構造に所属する酸素とは, 結合距離の変化の様子が大きく異なる. $t' = 0$ にある 3 本の酸素は, ほぼ 2.3 ~ 2.5 Å の結合距離を有しているが, t' の増加とともにこれら 3 個の酸素は遠ざかっていき, 次の 3 個の酸素が近づいてくる. 遠ざかる酸素と近づく酸素は, b_1 軸長に相当する並進の関係にあり, Ca は常に $[\text{CoO}_2]$ 部分構造内の 3 個の酸素と 2.4 Å 程度の結合を維持していることがわかる.

最後に, 電子伝導を担うと考えられる $[\text{CoO}_2]$ 部分構造内の Co-O 結合について見てみる. 図 6 下図は Co1-O1 距離を t' に対してプロットしたものである. $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]$ 部分構造内の原子間距離に比べて, 6 本ある Co1-O1 結合距離はいずれも変位変調は小さく, 1.8 ~ 2.0 Å の範囲で均等に変位している. この化合物には 2 種類のコバルトサイトがあるため, 酸素量からただちに両サイトのコバルトイオンの価数を見積もることは不可能である (構造式から見積もられるコバルトイオンの平均価数は +3.24 である). PREMOS にはボンドバレンスサム (BVS) を計算する機能も盛り込まれており, $\text{Co}^{3+}\text{-O}^{2-}$ 結合のボンドバレンスパラメータ $R_{ij} = 1.70 \text{ Å}^{1/4}$ を用いて計算された Co1 イオンの BVS を t' に対してプロットすると図 6 上図のようになる. BVS は t' の値によって多少の変動はあるものの, ほぼ +3.4 価と見積もられる. この値は, 単結晶試料を用いて

最近行われた光電子分光による実験結果 (+3.33 価)¹⁵⁾ より若干高くなっている。Co1 イオンの平均価数を +3.4 価と仮定すると、電荷中性則から $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]$ 部分構造内の Co2 イオンの価数はほぼ +3 価 ($S=0$) と見積もられる。しかし中性子回折によると、18 K 以下の温度範囲で両コバルトイオンの作る磁気副格子に由来する磁気反射が観測されることから、両コバルトサイトとも低スピン ($S=1/2$) の Co^{4+} イオンの存在が不可欠である。すなわち、いずれのサイトも 3 価と 4 価のコバルトイオンの混合価数状態にある。BVS の結果と実験値との不一致は、 R_{ij} がスピン状態によらず、 Co^{3+} の場合に一定値を仮定しているからであろう。実際の Co1 サイトの価数は、光電子分光の結果から得られた 3.3 価程度 ($\gamma\text{-Na}_x\text{CoO}_2$ と同レベル) であると思われる。今後は、共鳴実験などの手段を用いて、両コバルトイオンの正確な価数状態を決定する必要がある。

6. おわりに

本稿で紹介したミスフィット層状化合物 $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_p\text{CoO}_2$ は、三角格子と四角格子が交互に積層した、酸化物としては非常に奇妙な構造をしている。なぜコバルトが配位形態を変えて、しかも片方はその配列を大きく乱してまで、2 種類のサイトを占めようとするのだろうか。さらに優れた熱電特性を有する化合物は、どのような結晶構造をしているのだろうか。疑問は尽きないが、地道に物質探索を進めていくことで、これらの答えが見つかることを期待したい。

本研究を進めるにあたり、PREMOS91 を使った構造解析においてご教示をいただいた物質・材料研究機構の小野田みつ子氏、山本昭二氏に深く感謝いたします。また、透過型電子顕微鏡観察には大阪大学産業科学研究所の奥健夫氏に、中性子回折実験では日本原子力研究所の石井慶信氏に、それぞれお世話になりました。ここに感謝いたします。

文 献

- 1) I. Terasaki, Y. Sasago and K. Uchinokura: *Phys. Rev. B* **56**, R12685 (1997).
- 2) T. Itoh and I. Terasaki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, 6658 (2000); T. Itoh, T. Kawata, T. Kitajima and I. Terasaki: (ICT '98) Proc. 17th Int. Conf. Thermoelectrics (IEEE, Piscataway, 1999), p.595.
- 3) S. Li, R. Funahashi, I. Matsubara, K. Ueno, S. Sodeoka and H. Yamada: *J. Mater. Chem.* **9**, 1659 (1999).
- 4) R. Funahashi, I. Matsubara, H. Ikuta, T. Takeuchi, U. Mizutani and S. Sodeoka: *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L1127 (2000).
- 5) Y. Miyazaki, K. Kudo, M. Akoshima, Y. Ono, Y. Koike and T. Kajitani: *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L531 (2000).
- 6) A. C. Masset, C. Michel, A. Maignan, M. Hervieu, O. Toulemonde, F. Studer, B. Raveau and J. Hejtmanek: *Phys. Rev. B* **62**, 166 (2000).
- 7) 寺崎一郎: 本誌 p.27.
- 8) 小野田みつ子: 日本結晶学会誌 **40**, 202 (1998).
- 9) C. Brisi and P. Rolando: *Ann. Chim.* **58**, 681 (1968).
- 10) E. Woermann and A. Muan: *J. Inorg. Nucl. Chem.* **32**, 1457 (1970).
- 11) M. Shikano and R. Funahashi: *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1851 (2003).
- 12) A. Yamamoto: *Acta Cryst.* **A49**, 831 (1993).
- 13) M. Onoda, K. Kato, Y. Gotoh and Y. Oosawa: *Acta Cryst.* **B46**, 487 (1990).
- 14) N. E. Brese and M. O'Keefe: *Acta Cryst.* **B47**, 192 (1991).
- 15) 溝川貴司: 私信.

プロフィール

宮崎 譲 Yuzuru MIYAZAKI
 東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻
 Department of Applied Physics, Graduate School
 of Engineering, Tohoku University
 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉
 Aramaki Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan
 e-mail: miya@crystal.apph.tohoku.ac.jp
 最終学歴: 東北大学大学院工学研究科博士課程
 (1994 年)
 専門分野: 無機固体化学
 現在の研究テーマ: 新規熱電変換材料の探索