

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007 ~ 2011

課題番号：19051005

研究課題名（和文） III族クラスター系物質の物質探索

研究課題名（英文） Materials Search in Cluster-based Materials Constructed from Group III Elements

研究代表者

木村 薫 (KIMURA KAORU)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：30169924

研究成果の概要（和文）：

廃熱を電気エネルギーに変換することができる熱電変換材料の新しい性能向上設計指針を提案し、アルミ系正 20 面体準結晶に適用して指針の有効性を確かめた。 β 菱面体晶ボロンおよび α 正方晶ボロンでは、正 20 面体クラスターに属さないサイトの原子が抜けて、ドープ電子を自己補償することを発見した。一方、正 20 面体クラスターのみで構築される α 菱面体晶ボロンでは自己補償が起きず、Li ドープにより超伝導が発現した。

研究成果の概要（英文）：

We proposed a new guiding principle to improve thermoelectric performance and confirmed the efficiency in Al-based quasicrystals. We discovered self-compensation phenomena for doped-electron in β -rhombohedral and α -tetragonal boron. On the other hand, the self-compensation phenomena did not occur in α -rhombohedral boron and we found superconductive transition by Li-doping.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	19,800,000	0	19,800,000
2008 年度	11,700,000	0	11,700,000
2009 年度	9,000,000	0	9,000,000
2010 年度	8,100,000	0	8,100,000
2011 年度	2,700,000	0	2,700,000
総計	51,300,000	0	51,300,000

研究分野：材料物性学

科研費の分科・細目：材料工学・金属物性

キーワード：ナノ材料、クラスター、熱電変換材料、超伝導材料、準結晶

1. 研究開始当初の背景

研究開始以前の本研究代表者グループの研究により、ユビキタス元素であり、III 族元素であるボロン (B) やアルミ (Al) の正 20 面体クラスター固体の特徴と、それを利用した材料開発の可能性は、次のようなものであることが分かっていた。

特徴は、(1) 正 20 面体対称性が周期性と共存できないことから、複雑構造固体（巨大単

位胞結晶、準結晶、アモルファス）にならざるを得ない。(2) 周期表において金属結合と共有結合の境界にあり、金属結合-共有結合転換が起きる。(3) 正 20 面体が非常に高い対称性を持っているので、電子状態密度に擬ギャップや高い山を持つ。

(1)、(2)、(3) 前半の特徴から、Al 系では結合強度が弱い金属結合から強い共有結合までの広い分布を持ち、金属、半導体、分子

固体の中間に位置することを見出した。このことから、「重く強固なクラスターが弱く結合した固体」という熱電変換性能向上の設計指針を提案していた。

(3) 後半の特徴から、フェルミエネルギー (E_F) を状態密度の高い山の位置に調整できれば、高い転移温度の超伝導が期待できる。B の単体結晶として、正 20 面体クラスターを構造単位とする α 菱面体晶、 β 菱面体晶、 α 正方晶の 3 種類の結晶の生成方法と、Li や Mg の蒸気拡散法によるドーブ方法も確立していた。

(2) の特徴から、B と遷移金属のアモルファスは、高抵抗率と小さな温度依存性を併せ持つ高抵抗チップ材料の可能性を指摘していた。

2. 研究の目的

上記の背景から、以下の 3 つを目的とした。

1) Al 系準結晶において、「重く強固なクラスターが弱く結合した固体 (Weakly Bonded Rigid Heavy Clusters)」という熱電変換性能向上の設計指針の有効性を確認し、高い熱電変換性能を持った物質を探索する。

2) 3 種類の B 単体結晶に Li や Mg をドーブすることにより、高い転移温度を持った新超伝導体を探索する。

3) B と遷移金属のアモルファスにおいて、高抵抗チップ材料の目標物性値を持つ物質を探索する。

3. 研究の方法

上記の 3 つの目的に対して、下記のような方法で研究を行った。さらに、各目的を拡張するだけでなく、新たな

1) これまでの経緯から AlPdRe 系準結晶で、さらに AlPdMn 系で、Al の Ga 置換および Re の 3d 遷移金属置換により、クラスター内結合が強いままクラスター間結合を弱くし、熱電性能向上を試みた。これにより、従来の熱電材料開発において有効であった Phonon Glass Electron Crystal と本質的に異なり、我々が新たに提唱している熱電性能向上の設計指針である Weakly Bonded Rigid Heavy Clusters の有効性を確立することを試みた。加えて、関連物質である Al_2Ru 、 Ga_2Ru においても、熱電性能評価と性能向上を試みた。

2) α および β 菱面体晶ボロンや α 正方晶ボロン (ナノベルト) に Li や Mg (ユビキタス元素) の大量ドーブによる超伝導を目指すため、試料を入れた BN 坩堝を石英管の代わりにステンレス管やモリブデン管に封入してドーブした。これにより、石英が Li や Mg と反応して酸素が試料中に混入することを防

げたし、熱処理温度も上げることができた。

3) 高抵抗チップ材料として有望な V (ユビキタス元素) ドープボロンにおける結合転換を調べるため、V ドープ β 菱面体晶ボロンの電子密度分布を軌道放射光による回折測定と MEM/Rietvelt 法による解析で求めた。アモルファス相に対しては、EXAFS により構造、および XANES により電子状態を評価した。以上により、この系の金属結合-共有結合転換について明らかにした。

4) B や Al の正 20 面体等のクラスターの性質を調べるため、四重極および多重極イオントラップ中に、クラスターを孤立した状態で作製した。原料は水素化物のガスであり、これを電子ビームでイオン化やラジカル化し、トラップ中で反応させてクラスターに成長させた。本トラップの特性により、特定の質量数のクラスターのみを取り出せるので、それを堆積させてクラスターレベルで機能を制御した薄膜材料の創製へと繋がる。

5) B を主体とし、正 20 面体ではなく、正 10 角形クラスターを構造単位とする合金系において、正 10 角形準結晶や新しい近似結晶を探索した。B を主体としていることから、Al 系より半導体的性質が強く、熱電材料としても期待できる。

4. 研究成果

以下には、重要な成果が得られた、前述の研究方法の 1)、2) に対する結果を述べる。

1) Al 系準結晶の半導体化と熱電性能向上設計指針の確認

Al-遷移金属系準結晶は、中心に原子の無いマックイ正 20 面体クラスターを構造単位とする。このクラスターは Al 同士や Al と遷移金属間に強さの異なる共有結合を持つ一方、クラスター間の結合は比較的弱く金属結合に近いものも存在する。したがって、金属、共有結合固体 (半導体)、分子固体といった 3 つの典型的な固体の中間に位置していると考えられる。この固体は擬ギャップ中にフェルミエネルギーが位置する半金属的な電子構造を持つが、クラスター内結合をより強くし、クラスター間結合をより弱くする (より分子固体に近づける) と、ギャップがより深くなり、真のギャップになることが期待される。この方向は、キャリアの有効質量が大きくなると共に、重いクラスターが弱いバネで繋がった状況になり音速が遅くなって格子熱伝導率が下がり、2 重の意味で熱電性能指が向上することも期待できる。これを、「重く強固なクラスターが弱く結合した固体」という熱電性能向上設計指針として提案した。Al-Pd-Re 系における Re の Ru や Fe 置換、図

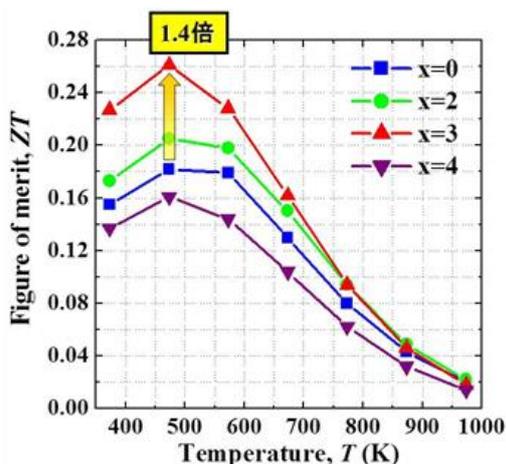


図1 Al_{1-x}Ga_xPd₂₀Mn_{95-x}準結晶の無次元熱電性能指数 Al の Ga 置換により性能指数が増大した

表1 13族-遷移金属系の熱電物性値

	Al ₂ Ru Ga ₂ Ru (800 K)	Al-Pd-Re準結晶 Al-Pd-Mn準結晶 (500 K)
電気伝導率 (Ω ⁻¹ cm ⁻¹)	1000	700
ゼーベック係数 (μVK ⁻¹)	170	90
熱伝導率 (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	5	1
無次元性能指数	0.5	0.26

1に示すAl-Pd-Mn系におけるAlのGa置換により実現し、無次元性能指数の向上に成功した。ただし、半導体化までには至っていない。

表1には、Al-遷移金属系準結晶も含まれる13族-遷移金属系の結晶と準結晶の熱電物性の最良値を比較して示す。Al₂RuおよびGa₂Ruは、Al-遷移金属系準結晶と同様の共有結合を有し0.3eV程度の狭い真のギャップを持つ結晶である。電気伝導率は両者でほぼ同じだが、ゼーベック係数は真のギャップを持つ結晶の方が擬ギャップを持つ準結晶より2倍程度大きく、熱伝導率は周期的に原子が並んだ結晶の方が非周期的な準結晶より5倍程度大きい。そのため無次元性能指数(ZT)は、実用化の目安である1より小さい同オーダーになっている。したがって、半導体準結晶を実現できれば、ZTが1~2.5になることが期待できる。

2-1) β菱面体晶ボロンへのLiまたはMgドープ時の自己補償の発見

図2は、カーボンとボロンにおける層状物質とクラスター固体の超伝導を整理したものである。KC₈等のグラファイトインターカレーション(GIC)は超伝導を示すが、転移点(T_c)は1K以下と低い。ところが同じ元素の組合せでもK₃C₆₀というフラーレンになると20Kに跳ね上がる。この最も大きな理由は、

前者が層状物質でフェルミエネルギーでの状態密度(N(E_F))が小さいのに対して、後者はC₆₀が正20面体対称性という高い対称性を持つため電子状態の縮重度が大きくなり状態密度の高いエネルギー領域が生じ、そこにE_Fが位置することによりN(E_F)が大きくなったことである。一方、MgB₂はGICと同じ蜂の巣格子の層状物質であるが、T_cはすでに約40Kと高い。C₆₀と同じ高い対称性を持ったB12の結晶にLiやMgをドープできれば、T_cが40Kを越えることも期待できる。第一原理計算によれば、Liをドープしたα菱面体晶ボロンのN(E_F)はMgB₂より大きい。

最初に試みた・菱面体晶へのLiドープやMgドープでは、ドープにより電気伝導率は上昇するが、温度依存性は可変領域ホッピング(VRH)伝導のままである。1価のLiでも2価のMgでも、単位胞に17電子までのドープに成功したが、図3に示すようにN(E_F)は一度増加するが、また減少してしまう。・菱面体晶は、B₁₂の電子不足を侵入型原子が、B₂₈の電子過剰を原子空孔が補償している自己補償結晶と考えられる。図3で単位胞に8電子までのドープでは、ドープ電子数が増えると共に、主に侵入型原子が抜けてドープ電子を補償し、内因性アクセプターを埋め尽くす。その後は、元から原子空孔が存在したサイトの空孔が増えると共に、元は原子空孔が存在しなかったサイトに新たな原子空孔も生じて、ドープ電子を補償してしまうことが分かった。このような、単体の結晶では唯一ボロ

	層状物質	クラスター固体
Carbon	KC ₈ ; T _c ~0.1[K] N(E _F)~14[states/eV nm ³] KC ₈	K ₃ C ₆₀ ; T _c ~20[K] N(E _F)~25[states/eV nm ³] K ₃ C ₆₀
Boron	MgB ₂ ; T _c ~40[K] N(E _F)~24[states/eV nm ³] MgB ₂	Li, B ₁₂ ; N(E _F)~39[states/eV nm ³] Mg, B ₁₂ ; Mg, B ₁₀₅ T _c ? Li, B ₁₂

図2 カーボンとボロンの層状物質とクラスター固体の超伝導

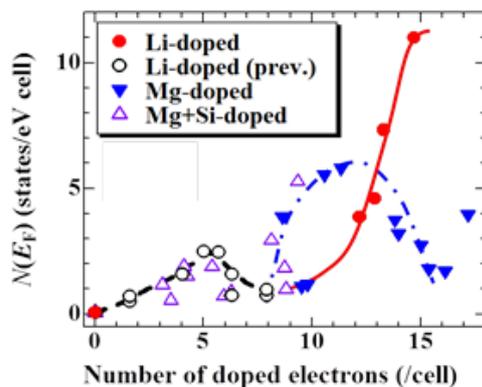


図3 LiやMgをドープしたβ菱面体晶の可変領域ホッピング伝導から求めたN(E_F)のドープ電子数依存性

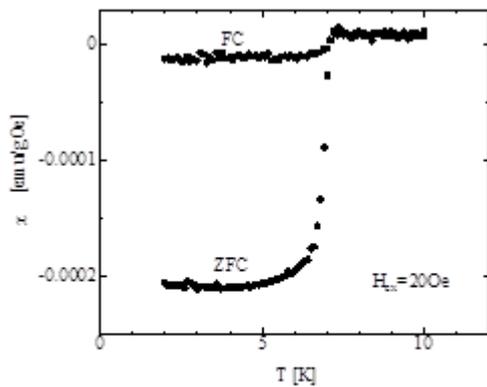


図4 Liをドーピングした α 菱面体晶の超伝導を示す磁化率の温度依存性

ンで起こる自己補償現象を発見した。同じことが α 正方晶でも起こることを見出した。

2-2) α 菱面体晶ボロンへのLiドーピングによる新超伝導体の創製

以上のように、 β 菱面体晶や α 正方晶では、LiやMgの大量ドーピングも容易であるが、 E_F を伝導帯にまで位置させ金属転移させることは、自己補償のために不可能であった。ただし、自己補償を起こすための原子の離脱は、 B_{12} に属するサイトでは決して起きなかった。したがって、 B_{12} のみを構造単位とする α 菱面体晶では、自己補償が起きず、ドーピングによる金属転移が可能であると考えられる。ところが、 α 菱面体晶へのLiやMgのドーピングは困難を極めた。やっと、酸による洗浄と、グリセリンを用いた遠心分離により、結晶粒の表面にへばり付いていた第2相を排除することができるようになり、Liドーピングにより図4に示すような T_c の最高が7Kの超伝導を発現させることに成功した。Liのドーピング量は、現状では単位胞に0.3個程度であり、より大量にドーピングできれば T_c はさらに高くなると期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計41件)
(すべて査読有)

- ① Hiroshi Hyodo, Akimitsu Nezu, Kohei Soga and Kaoru Kimura, Self-compensation property of β -rhombohedral boron doped with high Li concentration, *Solid State Sciences* (2012) in press (掲載確定).
- ② J. T. Okada, P. H.-L. Sit, Y. Watanabe, Y. J. Wang, B. Barbiellini, T. Ishikawa, M. Itou, Y. Sakurai, A. Bansil, R. Ishikawa, M. Hamaishi, T. Masaki, P.-F. Paradis, K. Kimura, T. Ishikawa and S.

Nanao, Persistence of Covalent Bonding in Liquid Silicon Probed by Inelastic X-Ray Scattering, *Physical Review Letters* **108**, 067402-1-4 (2012).

- ③ Takenori Nagatochi, Hiroshi Hyodo, Atsuro Sumiyoshi, Kohei Soga, Yohei Sato, Masami Terauchi, Fumitaka Esaka and Kaoru Kimura, Superconductivity in Li-doped α -rhombohedral boron, *Physical Review B* **83**, 184507-1-5 (2011).
- ④ Kazuhiro Kirihara, Takeshi Sasaki, Naoto Koshizaki and Kaoru Kimura, Seebeck Coefficient and Power Factor of Single-Crystalline Boron Nanobelts, *Applied Physics Express* **4**, 041201-1-3 (2011).
- ⑤ Kenji Tanabe, Kohei Soga, Shizuka Hosoi, Kazuaki Osumi, Hideshi Yamaguchi, Tomoya Uruga, and Kaoru Kimura, Low Critical Concentration of Metal-Insulator Transition of Vanadium Doped Amorphous Boron, *Journal of the Physical Society of Japan* **80**, 024709-1-11 (2011).
- ⑥ Kazuhiro Kirihara, Yoshiki Shimizu, Yoichi Yamada, Fumitaka Esaka, Takeshi Sasaki, Naoto Koshizaki, Hiroyuki Yamamoto, Shin-ichi Shamoto, and Kaoru Kimura, Carrier doping into boron nanobelts by neutron transmutation, *Applied Physics Letters* **97**, 212105-1-3 (2010).
- ⑦ Yoshiki Takagiwa, Junpei T. Okada and Kaoru Kimura, Composition dependence of thermoelectric properties of binary narrow-gap $Ga_{67-x}Ru_{33+x}$ compound, *Journal of Alloys and Compounds* **507**, 364-369 (2010).
- ⑧ Yuji Ohishi, Kaoru Kimura, Masaaki Yamaguchi, Noriyuki Uchida and Toshihiko Kanayama, Synthesis and formation mechanism of hydrogenated boron clusters $B_{12}H_n$ with controlled hydrogen, *Journal of Chemical Physics* **133**, 074305-1-7 (2010).
- ⑨ Yoshinobu Miyazaki, Junpei Okada, Eiji Abe, Yoshihiko Yokoyama, and Kaoru Kimura, Quasicrystalline Tenfold Symmetry Order in Boron Compounds, *Journal of the Physical Society of Japan* **79**, 073601-1-4 (2010). **Editors' Choice (JPSJ 注目論文)**
- ⑩ Yoshiki Takagiwa, Takahiko Kamimura, Junpei Tamura Okada and Kaoru Kimura, Thermoelectric Properties of Icosahedral Al-Pd-(Mn or Re) Quasicrystals: Improvement of the ZT

- Value by Ga Substitution for Al Atoms, Journal of Electronic Materials 39, 1885-1889 (2010).
- ⑪ Yoshiki Takagiwa, Yuka Matsubayashi, Akitoshi Suzumura, Junpei Tamura Okada and Kaoru Kimura, Thermoelectric Properties of Binary Semiconducting Intermetallic Compounds Al_2Ru and Ga_2Ru Synthesized by Spark Plasma Sintering Process, Materials Transactions 51, 988-993 (2010). (第5回日本熱電学会論文論文賞受賞論文)
- ⑫ Junpei T. Okada, Takehiko Ishikawa, Yuki Watanabe, Paul-Francois Paradis, Yasuhiro Watanabe and Kaoru Kimura, Viscosity of liquid boron, Physical Review B 81, 140201(R)-1-4 (2010). **Editors' Suggestion (PRB 注目論文)**
- ⑬ Michitaka Yamaguchi, Yuji Ohishi, Shizuka Hosoi, Kohei Soga and Kaoru Kimura, Metallic-covalent bonding conversion in boron icosahedral cluster solids studied using electron localizability indicator, J. Phys.: Conf. Ser. 176, 012027 (2009).
- ⑭ Yoshiki Takagiwa, Takahiko Kamimura, Shizuka Hosoi, Junpei T. Okada and Kaoru Kimura, Thermoelectric properties of Al-Pd-Re quasicrystal sintered by Spark Plasma Sintering (SPS): effect of improvement of microstructure, Zeitschrift fur Kristallographie 224, 79-83(2009).
- ⑮ Yoshiki Takagiwa, Takahiko Kamimura, Shizuka Hosoi, Junpei T. Okada and Kaoru Kimura, Thermoelectric properties of polygrained icosahedral $Al_{71-x}Ga_xPd_{20}Mn_9$ ($x=0, 2, 3, 4$) quasicrystals, Journal of Applied Physics 104, 073721-1-4 (2008).
- ⑯ Yuji Ohishi, Kaoru Kimura, Masaaki Yamaguchi, Noriyuki Uchida and Toshihiko Kanayama, Formation of hydrogenated boron clusters in an external quadrupole static attraction ion trap, The Journal of Chemical Physics 128, 124304-1-7 (2008).
- ⑰ Yoshiki Takagiwa, Junpei T. Okada, Kaoru Kimura, Hiroki Kitahata, Yasuhisa Matsushita and Ikuzo Kanazawa, Structural vacancies in Al-Pd-Mn quasicrystal and its (1/1, 2/1)-AlPdMnSi approximant crystals positron lifetime studies, Philosophical Magazine 88, 1929-1934 (2008).
- ⑱ H. Hyodo, S. Araake, S. Hosoi, K. Soga, Y. Sato, M. Terauchi and K. Kimura, Structure and electronic properties of Mg-doped β -rhombohedral boron constructed from icosahedral clusters, Phys. Rev. B 77, 024515-1-8 (2008).
- ⑲ J. T. Okada, T. Hamamatsu, S. Hosoi, T. Nagata, K. Kimura and K. Kirihara, Improvement of thermoelectric properties of icosahedral AlPdRe quasicrystals by Fe substitution for Re, J. Appl. Phys. 101, 103702-1-4 (2007).
- ⑳ S. Hosoi, H. Kim, T. Nagata, K. Kirihara, K. Soga, K. Kimura, K. Kato and M. Takata, Electron Density Distributions in Derivative Crystals of α -Rhombohedral Boron, J. Phys. Soc. Jpn. 76, 044602-1-8 (2007).
- ㉑ Y. Takagiwa, J. Kobayashi, Y. Matsushita, I. Kanazawa, T. Nagata, K. Kimura, and Y. Kobayashi, Composition dependence of positron annihilation lifetime for Al-Pd-Re-Ru quasicrystal and 2/1-AlPdRu approximant crystal, Phys. Stat. Sol. (c) 4, 3570-3572 (2007).
- ㉒ Y. Miyazaki, J. T. Okada, and K. Kimura, New approximant crystals of decagonal B-Mg-Ru quasicrystal, Phil. Mag. 87, 2701-2706 (2007).
- [学会発表] (計 139 件)
- ① 木村 薫, 半導体準結晶への2つのアプローチのその後とボロン系“準結晶”の発見, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 西宮, 2012年3月27日 (企画講演)
- ② K. Kimura, H. Hyodo, Y. Takagiwa, K. Kirihara, K. Soga, K. Kato and M. Takata, Self-Compensation and Bonding-Conversion in B-Based and Al-Based Icosahedral Cluster Solids, 17th International symposium on Boron, Borides and Related Materials, 11-17 September 2011, Istanbul, Turkiye (invited).
- ③ 高際良樹, 北原功一, 木村 薫, 狭バンドギャップ金属間化合物 $Ga_2Ru_{1-x}(Co, Rh)_x$ の熱電特性, 日本熱電学会 第 8 回学術講演会, 札幌, 2011年8月8-9日 (日本熱電学会講演奨励賞)
- ④ Y. Takagiwa, I. Kanazawa and K. Kimura, Thermoelectric properties of Al-based quasicrystals and related semiconducting intermetallic compounds, The 6th Asian International Workshop on Quasicrystal, 30 May-2 June 2011, Seoul, Korea (Invited).
- ⑤ Atsuro Sumiyoshi, Hiroshi Hyodo and Kaoru Kimura, Li Intercalation into

Hexagonal Boron Nitride, 2010 MRS Fall Meeting, 29 November-2 December 2010, Boston, USA (Poster). **Poster Award of Symposium CC**

- ⑥松林佑華, 高際良樹, 木村薫, Ga₃Ru 及び In₃Ru の熱電特性, 日本熱電学会 第7回学術講演会, 東京, 2010年8月19-20日 (日本熱電学会講演奨励賞)
- ⑦ Kazuhiro Kirihara, Kenji Kawaguchi, Yoshiki Shimizu, Takeshi Sasaki, Naoto Koshizaki, Kohei Soga, Hiroshi Hyodo, and Kaoru Kimura, Mechanism of Electrical Transport in Boron Nanobelts, 16th International Symposium on Boron, Borides and Related Materials (ISBB2008), September 7-12, 2008, Matsue, Japan (invited).
- ⑧ Katsuya Shimizu, Masahiro Kaneshige, Hiroshi Hyodo and Kaoru Kimura, Electrical Resistivity Measurements of α -Boron at High Pressure and Low Temperature, 16th International Symposium on Boron, Borides and Related Materials (ISBB2008), September 7-12, 2008, Matsue, Japan (invited).
- ⑨ K. Kimura, J. T. Okada, H. Kim, S. Hosoi, Y. Takagiwa, T. Kamimura, K. Akiyama, T. Hamamatsu, T. Nagata and K. Kirihara, Improvement of Thermoelectric Properties of Icosahedral Cluster Solids by Chemical Bonding Control, The DOYAMA SYMPOSIUM on Advanced Materials, September 6, 2007, Tokyo, Japan (invited).

[図書] (計4件)

- ①竹内伸、枝川圭一、蔡安邦、木村薫、朝倉書店、準結晶の物理、5章 準結晶の電子物性、7章 その他の物性 (7.1節 磁性)、8章 準結晶の応用の可能性 (8.1節 熱電材料の可能性) 69-86, 100, 111-115 (2012).
- ②高際良樹、木村薫、シーエムシー出版、熱電変換技術の基礎と応用 ―クリーンなエネルギー社会を目指して―、第3章 材料、12節 13族―遷移金属の擬ギャップ・狭ギャップ系材料、122-129 (2011).
- ③宇野良清、木村薫、シーエムシー出版、ホウ素・ホウ化物および関連物質の基礎と応用、ホウ素固体の物理的性質、化学的性質、3-48 (2008).
- ④木村薫、岡田 純平、エヌ・ティー・エス、熱電変換技術ハンドブック、クラスター固体、191-200 (2008).

[その他]

ホームページ

<http://www.phys.mm.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 薫 (KIMURA KAORU)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号：30169924

(2) 研究分担者

桐原 和大 (KIRIHARA KAZUHIRO)
独立行政法人産業技術総合研究所・ナノテクノロジー研究部門・研究員
研究者番号：70392610
(2010年度まで)

曾我 公平 (SOGA KOHEI)
東京理科大学・基礎工学部・准教授
研究者番号：50272399
(2008年度より連携研究者)

岡田 純平 (OKADA JUNPEI)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教
研究者番号：90373282
(2008年度より連携研究者)

(3) 連携研究者

高際 良樹 (TAKAGIWA YOSHIKI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教
研究者番号：90549594
(2009年度より)

兵藤 宏 (HYODO HIROSHI)
東京理科大学・基礎工学部・助教
研究者番号：50272399
(2009年度より)

金沢 育三 (KANAZAWA IKUZO)
東京学芸大学・教育学部・教授
研究者番号：00134768
(2009年度より)