

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 16 日現在

機関番号：14301
 研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21246101
 研究課題名（和文） シリサイド半導体の特異なマルチモルフィズムとその材料工学への応用
 研究課題名（英文） Multimorphism observed in peculiar silicide semiconductors and its applications to materials science
 研究代表者
 乾 晴行（INUI HARUYUKI）
 京都大学大学院工学研究科・教授
 研究者番号：30213135

研究成果の概要（和文）：副格子の配列の多様性に基づいた特異なマルチモルフィック微細組織を制御して、Ru シリサイドの熱電変換特性の改善および新たな物質探索、特性向上の指導原理の確立を目指した。マルチモルフ界面では、金属副格子の結晶方位は一定に保たれた中で Si 副格子の周期が変化しており、電気伝導は阻害されず、熱伝導のみ低下させる理想的な界面と考えられ、実験によりマルチモルフィズムを利用したナノ組織制御により熱電特性を飛躍的に向上させることができることが示された。

研究成果の概要（英文）：The possibility for the improvement of thermoelectric properties of Ru silicide (Ru_2Si_3) has been investigated through controlling multimorphic nano-structures that are formed based on the variety of the arrangement of the Si sublattice. An attempt has also been made to establish a guiding principles for new materials search for better thermoelectric properties and the property improvement. The multimorphic interface that is recently found to occur between a series of Chimney-Ladder compounds possesses an idealistic interface to scatter phonon but to transmit electrons, since the metal sublattice is kept the same across the interface but the periodicity of screw arrangement of Si atoms is different across the interface. The effectiveness of the multimorphic interface in improving the thermoelectric properties of Ru silicide-based materials was clearly shown by experiment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
21 年度	21,400,000	6,420,000	27,820,000
22 年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
23 年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
年度			
年度			
総計	36,000,000	10,800,000	46,800,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：熱電変換材料、無次元性能指数、ゼーベック係数、電気伝導度、熱伝導度、微細組織、ラットリング、透過電子顕微鏡法

1. 研究開始当初の背景

地球環境問題での CO_2 排出量削減、エネルギー有効利用やエレクトロニクス産業の高機

能化（局所精密冷却）の観点から熱電発電・冷却に対する関心が高まり、熱電材料に注目が集まっている。熱電材料の特性は、ゼーベ

ック係数、電気伝導度、熱伝導度を α , σ , κ , とすると、性能指数 $Z=\alpha^2\sigma/\kappa$ あるいはこれに温度 T を乗じた無次元性能指数 ZT で表される。この値が大きいほど熱 \leftrightarrow 電気の変換効率が大きく、 $ZT=1$ が実用化の目安とされている。PGEC (Phonon-Glass Electron-Crystal) なる概念が提唱され、フォノンがガラスのように散乱し (熱は通さない)、電子は結晶のように良く通す (電気は通す) 様な物質を結晶構造の観点から探索する研究が世界的になされている。ラットリングする重原子をケージ構造に閉じ込めたような結晶構造を取るスックテルナイト化合物やクラスレート化合物がその例である。それ以外にも、多種多様な材料が熱電材料として可能性を試されており、環境共生型シリサイド半導体と呼ばれる一連の材料もその1つである。Fe や Mn のシリサイドは集中的に研究がなされた代表例であるが、実用化には更なる特性の改善が必要と考えられている。そのような中、我々は独自に Ru のシリサイドに注目して熱電特性を調べ、これらシリサイドがある特異な微細組織を呈する場合に良好な熱電特性を示すことを見出した。この特異な微細組織はシリサイドを形成する副格子 (サブラティス) の配列の多様性に基ついたもので、副格子の配列により結晶相が異なり、一連の異なる結晶構造 (マルチモルフ) が1つの試料に密に形成されるものである。このマルチモルフで重要なことは、金属副格子の結晶方位は一定に保たれた中で Si 副格子の周期が変化するという事実である。これは、「金属副格子の結晶方位は一定に保たれた中で Si 副格子の周期が変化するため、電気伝導は阻害されず、熱伝導のみ低下する熱電材料として理想的な界面が多数形成される」ことを意味し、Ru のシリサイドを例に取り上げ、その特性改善および新たな物質探索、特性向上の指導原理の確立を目指した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、(1)この特異なマルチモルフな微細組織の詳細、形成要因ならびにそれに伴う特性発現機構を明らかにし、その知見から、(2) Ru シリサイドなどチムニーラダー構造を持つシリサイド半導体の熱電特性の更なる改善を目指すとともに、(3) マルチモルフィズムなる概念が熱電変換の物質探索、特性改善の新たな指導原理となり得るか検証することである。

3. 研究の方法

チムニーラダー構造を持つ Ru シリサイドの Si 副格子の変調は、添加元素の含有量による M (金属) /Si 原子比の変化により起こるため、1 金属原子あたりの価電子数 (VEC) 14 を基本組成として 3 元化合物の固溶範囲の拡張が起こると考えられ、光学式浮遊帯域溶融法

により単結晶および多結晶試料の作製を行った。添加元素には、Re, Mn, Ir を選定した。作製した結晶試料について、相構成、添加元素の固溶度、微細組織を EDS 元素分析を併用しながら走査電子顕微鏡、透過電子顕微鏡法を用いて行った。熱電物性 (熱伝導、電気伝導度、ゼーベック係数、ホール係数) は室温 (必要に応じて液体ヘリウム温度) から 800°C の広い温度範囲で行った。これらに加え、マルチモルフィック界面がフォノン散乱 (熱伝導) に与える影響を評価するため以下のような項目についても研究を行った。

(1) マルチモルフィックな微細組織の局所的熱伝導度測定: マルチモルフィックな微細組織について局所的な熱伝導度測定を光反射率顕微鏡法 (PRM: Photoreflectance Microscopy) を用いて行った。この方法では、試料に与えた熱パルスの温度の揺らぎを熱拡散の位相のずれから熱拡散率に換算する。バルク測定値と比較して、相間界面のフォノン散乱の有効性を評価する。

(2) 異常な原子熱振動の探知とその可視化: 球面収差補正をした上で環状検出器の検出角度を種々変えて HAADF-STEM 撮影を行うと、原子のイメージには熱散漫散乱の散乱角度依存が映し出され理論式へのフィッティングから原子の熱振動を可視化できる。HAADF-STEM イメージングでは結晶構造を反映した原子像が取れるため、X 線回折の結果を検証することが出来る。熱、電気伝導など輸送特性は Si 副格子の変調界面のケミストリー、モフォロジーに強く依存し、界面の構造、化学組成の急峻さをナノスケールで解析することが重要である。金属、Si 両原子がイメージングできる球面収差補正を伴う HAADF-STEM イメージングで、Si 副格子の変調領域の厚さ、変調界面のシャープさ、界面の弾性歪を原子尺度で明らかにする。

4. 研究成果

Ru シリサイド (Ru_2Si_3) に Ru とは価電子数の異なる Re や Mn を添加すると、2 元系では高温でしか安定でないチムニーラダー構造が低温でも安定に現れ、 $\text{Ru}_2\text{Si}_3\text{-ReSi}_{1.75}$ 擬 2 元系で広い固溶域を形成する。この擬 2 元系固溶域では金属 (M) /シリコン (Si) 原子比は、1 金属原子あたりの価電子数 (VEC) 14 を維持しようと、合金元素添加量とともに順次減少するが、金属原子の副格子を一定に保ったまま Si 副格子の大きさを次々変える一連のチムニーラダー化合物が形成される。しかも、1 つの合金組成で 1 種のチムニーラダー化合物だけを観察することは稀で、合金組成によっては、主相に加えて粒界近傍に一連のチムニーラダー化合物からなる遷移領域が形成される。この遷移領域には、数種のことなる組成を持つチムニーラダー化合物が、数 μm

幅にわたって形成される。Re 添加材ではこのような遷移領域は粒界近傍に限定されるが、Mn や Ir 添加材では試料全面に渡るほど広い領域で遷移領域が形成される。この特異な微細組織はシリサイドを形成する副格子（サブラティス）の配列の多様性に基ついたもので、副格子の配列により結晶相が異なり、一連の異なる結晶構造（マルチモルフ）が1つの試料に密に形成される。具体的には、金属原子が形成する金属副格子（チムニー）はほぼ一定のまま、Si 副格子（ラダー）のらせん状原子配列の周期が変動し、金属副格子の添加元素濃度に応じた価電子数則（VEC=14 rule）を満足するようにらせん状原子配列の周期を変動させている。この異なるチムニーラダー相間の界面（マルチモルフ界面）は、必ずしも原子レベルで平滑で相変化がステップ上に起こるわけではないが、フォノンを散乱するには十分な急峻な相界面である。Mn 添加に比べ価数変動の激しい Ir 添加剤では、個々のマルチモルフ界面での組成変化は大きく、フォノン散乱能は高いと考えられる。

Si/(Ru+合金元素)-合金元素プロットにより p-n 伝導の制御が出来る。Re 添加に比べ Mn 添加材ではより広い組成範囲で n 型伝導を示し、p-n 伝導の遷移がかなり高 Mn 添加量でしか実現しない。これは、Re 添加に比べ Mn 添加では金属副格子の体積膨張が小さいためである。Mn 添加材では、Ru と Mn の原子量が大きく異なるため、かなり広い組成範囲の一連のチムニーラダー相が1つの試料に密に形成される。金属副格子の結晶方位は一定に保たれた中で Si 副格子の周期が変化するため、電気伝導は阻害されず、熱伝導のみ低下する熱電材料として理想的な界面が多数形成される。

単結晶状の試料を作成し、熱電特性を測定すると Ru を Mn で 90%置換した材料で、無次元性能指数(ZT)が 880 K で 0.76 と非常に大きな値を示した。これは、ナノ組織制御により熱電特性を飛躍的に向上させることができることを示唆している。また凝固速度を変化させ、マルチモルフ界面の密度を変化させると、界面密度の増加につれ、無次元性能指数は最高値で 0.62 から 0.86 へと増大した。これは、マルチモルフィズムを利用したナノ組織制御により熱電特性を飛躍的に向上させることができることを顕示している。

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 23 件)

1. K. Yuge, Y. Koizumi, K. Hagiwara, T. Nakano, K. Kishida and H. Inui, First-Principles Study on Phase Stability of $\text{MoSi}_2\text{-NbSi}_2$ Pseudobinary

Alloys, Physical Review, 査読有, Vol. B85 (2012), No. 13, 134106-1-6.

2. S. Harada, K. Tanaka, K. Kishida, N.L. Okamoto, N. Endo, E. Okunishi and H. Inui, Direct Observation of Vacancies and Local Thermal Vibration in Thermoelectric Rhenium Silicide, Applied Physics Express, 査読有, Vol. 5 (2012), No. 3, 035203-1-3.

3. T. Murakami, Y. Hibi, H. Mano, K. Matsuzaki and H. Inui, Friction and Wear Properties of Fe-Si Intermetallic Compounds in Ethyl Alcohol, Intermetallics, 査読有, Vol. 20 (2012), No. 1, 68-75.

4. D-B. Xiong, N.L. Okamoto, T. Waki, Y-F. Zhao, K. Kishida and H. Inui, High-TC Ferromagnetic Semiconductor-like Behavior and Unusual Electrical Properties in Compounds with a $2\times 2\times 2$ Superstructure of the Half-Heusler Phase, European Journal of Chemistry, 査読有, Vol. 18 (2012), No. 9, 2536-2542.

5. D.B. Xiong, N.L. Okamoto, H. Inui, Planar Symmetry Incompatibility in Ru-Sn-Zn Pseudo-Decagonal Approximants Composed of Novel Pentagonal Antiprisms, Inorganic Chemistry, 査読有, Vol. 50 (2011), No. 3, 827-835.

6. S. Harada, H. Hoshikawa, K. Kuwabara, K. Tananaka, E. Okunishi and H. Inui, Crystal Structure Refinement of $\text{ReSi}_{1.75}$ with an Ordered Arrangement of Silicon Vacancies, Philosophical Magazine, 査読有, Vol. 91 (2011), No. 23, 3108-3127.

7. Y. Ochiai, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Mechanical Properties of Cr_5Si_3 with the D8_m Structure, Materials Research Society Symposium Proceedings, 査読有, Vol. 1295 (2011), 213-218.

8. S. Harada, K. Tanaka, K. Kishida, N.L. Okamoto, H. Inui, N. Endo and E. Okunishi, Direct Observation of an Ordered Arrangement of Vacancies and Large Local Thermal Vibration in Rhenium Silicide by Cs-corrected STEM, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 1295 (2011), 397-402.

9. 岡本範彦, 足立大樹, 岸田恭輔, 田中克志, 乾 晴行, PBET 界面制御によるチムニーラダー化合物の熱電特性改善, 日本金属学会報, 査読有, Vol. 50 (2011), No. 4, 149-151.

10. D.B. Xiong, N.L. Okamoto, H.Inui, Planar Symmetry Incompatibility in Ru-Sn-Zn Pseudo-Decagonal Approximants Composed of Novel Pentagonal Antiprisms, *Inorganic Chemistry*, 査読有, Vol. 50 (2011), 827-835.
11. T. Kume, S. Ohno, S. Sasaki, H. Shimizu, Y. Ohishi, N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H.Inui, Pressure Induced Phase Transformation of $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$ Clathrate Studied by X-Ray Diffraction and Raman Spectroscopy, *Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 10 (2010), 013517-1-7.
12. D.B. Xiong, Y.F. Zhao, N.L. Okamoto, C. Pietzonka, T. Waki and H.Inui, $\text{Ru}_9\text{Zn}_7\text{Sb}_8$: A Structure with $2 \times 2 \times 2$ Supercell of Half-Heusler Phase, *Inorganic Chemistry*, 査読有, Vol. 49 (2010), 10536-10542.
13. D.B. Xiong, Y.F. Zhao, W. Schnelle, N.L. Okamoto and H.Inui, Complex Alloys Containing Double-Mackay Clusters and $(\text{Sb}_{1-\delta}\text{Zn}_\delta)_{24}$ Snub Cubes Filled with Highly Disordered Zinc Aggregates: Synthesis, Structures and Physical Properties of Ruthenium Zinc Antimonides, *Inorganic Chemistry*, 査読有, Vol. 49 (2010), 10788-10797.
14. N.L. Okamoto, T. Koyama, K. Kishida, K. Tanaka and H.Inui, Structural and Thermoelectric Properties of Chimney-Ladder Compounds in the Ru-Mn-Si System, *Journal of Electronic Materials*, 査読有, Vol.39 (2010), 1640-1644.
15. N.L. Okamoto, Y. Hashimoto, T. Koyama, H. Adachi, K. Kishida, K. Tanaka and H.Inui, Improvement of the Thermoelectric Properties of the Chimney-Ladder Compounds in the Ru-Mn-Si System, *MRS Symposium Proceedings*, 査読有, Vol. 1218E (2010), Z06-09.
16. S. Harada, K. Tanaka and H. Inui, Reduction in the Thermal Conductivity of Thermoelectric Titanium Oxide by Introduction of Planar Defects, *MRS Symposium Proceedings*, 査読有, Vol. 1218 (2010), Z01-04.
17. N.L. Okamoto, Y. Hashimoto, T. Koyama, H. Adachi, K. Kishida, K. Tanaka H. Inui, Improvement of the Thermoelectric Properties of the Chimney-Ladder Compounds in the Ru-Mn-Si System, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 査読有, Vol. 1218 (2010), Z06-09.
18. T. Kume, S. Ohno, S. Sasaki, H. Shimizu, Y. Ohishi, N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H.Inui, Pressure Induced Phase Transformation of $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$ Clathrate Studied by X-Ray Diffraction and Raman Spectroscopy, *Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 107 (2010), 013517-1-7.
19. K. Kishida, A. Ishida, T. Koyama, S. Harada, N.L. Okamoto, K. Tanaka and H.Inui, Thermoelectric Properties of Ternary and Al Substituted $\text{Ru}_{1-x}\text{Re}_x\text{Si}_y$ Chimney-Ladder Compounds, *Acta Materialia*, 査読有, Vol. 57 (2009), 2010-2019.
20. N.L. Okamoto, T. Koyama, K. Kishida, K. Tanaka and H.Inui, Crystal Structures and Thermoelectric Properties of Chimney-Ladder Compounds in the $\text{Ru}_2\text{Si}_3\text{-Mn}_4\text{Si}_7$ Pseudobinary System, *Acta Materialia*, 査読有, Vol. 57 (2009), No. 7, 5036-5045.
21. S. Harada, K. Tanaka, K. Kishida, N.L. Okamoto and H.Inui, Change in the Thermoelectric Properties with the Variation in the Defect Structure of $\text{ReSi}_{1.75}$, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 査読有, Vol. 1128 (2009), U01.07.1-6.
22. T. Koyama, N.L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka and H.Inui, Crystal Structure and Thermoelectric Properties of Mn-Substituted Ru_2Si_3 with the Chimney-Ladder Structure, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 査読有, Vol. 1128 (2009), U05.01.1-6.
23. N.L. Okamoto, T. Nakano, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Mechanical and Thermal Properties of Single Crystals of Some Thermoelectric Clathrate Compounds, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 査読有, Vol. 1128 (2009), U01.11.1-6.

〔学会発表〕 (計 27 件)

- 山崎敏広, 小泉雄一郎, 千葉晶彦, 萩原幸司, 中野貴由, 弓削是貴, 乾 晴行, フェーズフィールド法による $\text{NbSi}_2/\text{MoSi}_2$ 相界面の緩和, 日本金属学会 2012 年春期 (第 150 回) 大会, 2012 年 3 月 28 日-30 日, 横浜国立大学.
- 弓削是貴, 岸田恭輔, 乾 晴行, 小泉雄一郎, 萩原幸司, 中野貴由, 第一原理計算に基づく合金の相安定性の予測: $\text{MoSi}_2\text{-NbSi}_2$ 擬二元系合金, 日本金属学会 2012 年春期 (第 150

回) 大会, 2012年3月28日-30日, 横浜国立大学.

3. 藤原宏介, 笹井雄太, 岸田恭輔, 乾 晴行, 第3元素添加 $\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3$ 合金共晶組織の熱安定性, 日本金属学会 2012年春期 (第150回) 大会, 2012年3月28日-30日, 横浜国立大学.

4. 熊 定邦, 岡本範彦, 岸田恭輔, 乾 晴行, Enhanced Thermoelectric Performance of p-type ZnSb as an Eco-benign and Inexpensive Material, 日本金属学会 2012年春期 (第150回) 大会, 2012年3月28日-30日, 横浜国立大学.

5. 岡本範彦, 岸田恭輔, 乾 晴行, 第3元素添加 Mn シリサイドの結晶構造と熱電特性, 日本金属学会 2012年春期 (第150回) 大会, 2012年3月28日-30日, 横浜国立大学.

6. H. Inui, K. Kishida and N.L. Okamoto, Plasticity and Dislocation Structures in L1_2 -Ordered Intermetallic Compounds and Transition-Metal Silicides, 2012 TMS Annual Meeting & Exhibition, 2012年3月11日-15日, Orlando, U. S. A.

7. 岡本範彦, 乾 晴行, チムニーラダーシリサイドのナノ構造制御による熱電特性向上, 日本熱電学会第14回熱電研究会, 2012年1月10日, 大阪大学吹田キャンパス.

8. 宮内洋平, 多田昌浩, 吉矢真人, 安田秀幸, 原田俊太, 田中克志, 乾 晴行, 周期的面欠陥を有する magnéli 相 TiO_{2-x} の結晶構造と格子熱伝導度低下の関連性評価, 日本金属学会 2011年秋期 (第149回) 大会, 2011年11月7日-9日, 沖縄コンベンションセンター.

9. 山崎敏広, 小泉雄一郎, 千葉晶彦, 萩原幸司, 中野貴由, 弓削是貴, 乾 晴行, Phase-field 法による $\text{NbSi}_2/\text{MoSi}_2$ 相界面への偏析の研究, 日本金属学会 2011年秋期 (第149回) 大会, 2011年11月7日-9日, 沖縄コンベンションセンター.

10. 岡本範彦, 乾 晴行, 異相界面制御によるチムニーラダーシリサイドの熱電特性向上, 粉体粉末冶金協会平成 23 年度秋季大会, 2011年10月26日, 大阪大学吹田キャンパス.

11. H. Yokobayashi, K. Kishida, H. Inui, M. Yamasaki and Y. Kawamura, HAADF-STEM Analysis of the Crystal Structure of a Long Period Stacking Ordered Phase in a Mg-Al-Gd Alloy, European Congress on Advanced Materials and Processes (Euromat 2011), 2011年9月12日-15日, Montpellier, France.

12. 熊定邦, 岡本範彦, 岸田恭輔, 乾 晴行, Tuning of Thermoelectric Properties of Half-Heusler Phase $\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x\text{TiSb}$, 日本金属学会 2011年春期 (第148回) 大会, 2011年3月24日, 東京都市大学.

13. 原田俊太, 田中克志, 岡本範彦, 乾 晴行, 空孔規則配列相を有する $\text{ReSi}_{1.75}$ の異方的な熱電特性, 日本金属学会 2011年春期 (第148回) 大会, 2011年3月24日, 東京都市大学.

14. D.B. Xiong, N.L. Okamoto, S. Harada, K. Tanaka, K. Kishida, H. Inui, Formation and Physical Properties of Compounds with Supercell Structure of Normal Half-heusler Phase, MRS 2010 Fall Meeting on Solid-State Chemistry of Inorganic Materials VIII, 2010年11月29日, Boston, U. S. A.

15. S. Harada, K. Tanaka, N. L. Okamoto, H. Inui, Direct Observation of an Ordered Arrangement of Vacancies and Large Local Thermal Vibration in Rhenium Silicide by Cs-corrected STEM, MRS 2010 Fall Meeting on Intermetallic Based Alloys for Structural and Functional Applications, 2010年11月29日, Boston, U. S. A.

16. D.B. Xiong, N.L. Okamoto, S. Harada, K. Tanaka, K. Kishida, H. Inui, Transport Properties of Half-Heusler-Type Structure in Co-Zn-Sb System, 日本金属学会 2010年春期 (第147回) 大会, 2010年9月25日, 北海道大学.

17. 岡本範彦, 乾 晴行, チムニーラダーシリサイドの構造制御と熱電特性, 日本金属学会 2010年春期 (第147回) 大会, 2010年9月25日, 北海道大学.

18. 岡本 範彦, 横林 秀幸, 小山 達也, 足立 大樹, 岸田 恭輔, 田中 克志, 乾 晴行, ヘミコヒーレント界面を有するチムニーラダーシリサイドの熱電特性, 第七回日本熱電学会学術講演会, 2010年4月27日, 東京大学弥生講堂.

19. N. L. Okamoto, T. Koyama, H. Adachi, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Bulk Thermoelectric Silicides with the Chimney-Ladder Structure Containing Phonon-Blocking and Electron-Transmitting Interfaces, The 29th International Conference on Thermoelectrics, 2010年5月30日, Shanghai, China.

20. H. Inui, Nano-Scale Characterization of

Structural and Functional Transition Metal Silicides by Scanning Transmission Electron Microscopy, International Conference on Nanomaterials Synthesis Characterization and Applications, 2010年4月27日, Kottayam, India.

21. 横林秀幸, 橋本 裕, 岡本範彦, 足立大輝, 岸田恭輔, 田中克志, 乾 晴行, チムニーラダーシリサイドに存在する特異な界面と熱伝導, 日本金属学会2010年春期(第146回)大会, 2010年3月28日, 筑波大学筑波キャンパス.

22. 原田俊太, 田中克志, 乾 晴行, シアー構造を有するMagneli相化合物の構造変化と熱電特性, 日本金属学会2010年春期(第146回)大会, 2010年3月28日, 筑波大学筑波キャンパス.

23. N. L. Okamoto, T. Koyama, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui, Improvement of the Thermoelectric Properties of the Chimney-Ladder Compounds in the Ru-Mn-Si System, MRS 2008 Fall Meeting on Energy Harvesting -From Fundamentals to Devices, 2009年11月30日, Boston, U. S. A.

24. S. Harada, K. Tanaka and H. Inui, Reduction in the Thermal Conductivity of Thermoelectric Titanium Oxide by Introduction of Planar Defects, MRS 2008 Fall Meeting on Energy Harvesting -From Fundamentals to Devices, 2009年11月30日, Boston, U. S. A.

25. 乾 晴行, シリサイド半導体のナノ構造制御と熱電特性, 応用物理学会平成21年度関西支部シンポジウム「材料・デバイスが拓く創エネルギー技術の新展開」, 2009年11月16日, 島津製作所関西支社マルチホール.

26. 原田俊太, 田中克志, 岸田恭輔, 岡本範彦, 乾 晴行, 遠藤徳明, 奥西栄治, HAADF-STEM法による Re_3Si_7 の結晶構造解析, 日本金属学会2009年秋期(第145回)大会, 2009年9月15日, 京都大学吉田キャンパス.

27. 橋本 裕, 岡本範彦, 岸田恭輔, 田中克志, 乾 晴行, Ir添加 Mn_4Si_7 チムニーラダー化合物の結晶構造と熱電特性, 日本金属学会2009年秋期(第145回)大会, 2009年9月15日, 京都大学吉田キャンパス.

[図書] (計0件)
該当なし

[産業財産権]
○出願状況(計0件)

該当なし

○取得状況(計0件)
該当なし

[その他]
ホームページ等
<<http://www.mtl.kyoto-u.ac.jp/groups/inui-g/inui.html>>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

乾 晴行 (INUI HARUYUKI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 30213135

(2) 研究分担者

岸田 恭輔 (KISHIDA KYOSUKE)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 20354178

岡本 範彦 (OKAMOTO NORIHIKO)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60505692

(3) 連携研究者

なし