

平成22年 12月 31日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560713
 研究課題名（和文） 新規クラスレート半導体の創製と熱電変換材料への応用に関する研究
 研究課題名（英文） Study on Creation of Novel Clathrate Semiconductors and Their Application to Thermoelectric Materials
 研究代表者
 阿武 宏明（ANNO HIROAKI）
 山口東京理科大学・工学部・准教授
 研究者番号：60279106

研究成果の概要（和文）：本研究は省エネルギー・環境共生型社会の実現に向けて膨大な量の未利用廃熱を電気エネルギーに直接変換する熱電変換材料の開発を目指し、クラスレート半導体がもつ特異な結晶構造の操作・制御による熱電性能を向上させるための材料設計に関する基礎的研究を行った。その結果、種々の元素置換による構造変調により熱電性能向上に繋がるキャリア輸送特性とフォノン物性への効果を明らかにした。今後、この材料設計を発展させれば新しいタイプの高性能熱電材料の創製に繋がることが期待される。

研究成果の概要（英文）： It is highly desired to find new materials for thermoelectric energy conversion, by which the electric power can be generated directly from an enormous amount of waste heat, toward the goal of realizing the energy conservation and environmental coexistence society. We have studied the material design and the control of the thermoelectric properties in silicon- and germanium-based clathrate semiconductors, utilizing a high degree of freedom in the cage-like crystal structure which consists of polyhedral networks (host) including guest atoms inside the voids. The novel structural manipulation and control by elemental substitutions on host lattice and guest sites cause a significant increase of the thermoelectric power due to the modifications of the electronic structure and a decrease of the lattice thermal conductivity due to the enhanced phonon scattering. The development of clathrate semiconductors on the material design found in this study will lead to the creation of novel thermoelectric materials with high conversion efficiency.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：電子材料、熱電変換工学

科研費の分科・細目：材料工学、構造・機能材料

キーワード：省エネルギー、熱電変換、クラスレート、元素置換、ゼーベック係数、フォノン、有効質量、電子構造

1. 研究開始当初の背景

熱電変換技術は、固体素子に熱流を通してゼーベック効果により熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換する技術で、無駄に放出されている廃熱からエネルギーを回収して再利用するキーテクノロジーとして注目されている。地球温暖化・環境問題と化石燃料枯渇の問題・省エネルギー対策とも絡んで、熱電変換技術に対する社会的ニーズは益々増えてきている。現在実用化されている汎用熱電材料には Bi_2Te_3 があるが、利用温度が室温付近に限られ、構成元素の資源量が少なく毒性のあることも問題がある。熱電変換技術の実用化に向けては、資源的に豊富で低環境負荷の元素からなり、高温で優れた熱電特性をもつ新材料の開発が課題である。

熱電材料の変換効率は、熱電性能指数 $Z=S^2\sigma\kappa$ (S はゼーベック係数、 σ は電気伝導度、 κ は熱伝導度) によって評価される。熱電性能向上のための材料設計の重要な指針は、材料の物質パラメータ $B=m^{*3/2}\mu/\kappa_L$ (m^* は有効質量、 μ はキャリア移動度、 κ_L は格子熱伝導度) を大きくすることである。この物質パラメータを大きくするための新しい概念による物質開発の試みが 1990 年代から始まっており、いくつかの新材料が発見された。熱電分野において新しく取り入れられた材料開発の概念には、超格子・低次元構造物質、Phonon Glass Electron Crystal (PGEC)、強相関物質、層状酸化物、ナノブロックインテグレーションなどがある。PGEC は 1995 年に米国の Slack によって提唱された概念で、熱はガラス (非晶質) のように伝えにくい、電気は結晶のように良く伝える物質の意である。Slack は PGEC の候補として、内部に大きな空隙のあるかご状の結晶構造をもち空隙中に弱く結合した原子 (ゲスト) を含む物質の探索を提案した。有望な材料系として 1990 年代中頃から充填スキュッテルダイト構造が注目され現在まで研究が進行している。筆者らはこれまでに Yb を充填したスキュッテルダイト化合物 ($\text{Yb}_y\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ 系化合物) の開発を行い、熱電性能指数 $ZT=1$ (変換効率 10%) を達成しており、Slack の提案する材料探索のアプローチを支持する結果を得ている。最近の数年間は、クラスレート構造が取り挙げられ、熱電特性の調査・研究が活発化している。筆者らは、ゲルマニウム (Ge) クラスレート半導体の開発研究に取り組んで種々の元素置換によるキャリア制御・ゼーベック係数向上に関しての有益な知見を得ている。しかし、変換効率 10% を超える性能向上にはまだ至っておらず、クラスレート材料の開発に

おいて研究課題が残されている。現在のところ国内外の研究は錫 (Sn) 系・Ge 系クラスレートが中心であり、またフォノン物性に関する基礎的な研究が殆どである。したがって、熱電発電応用に向けた工学的観点からのクラスレート材料の研究を進め、熱電材料としての設計・特性の最適化についての基礎的研究が必要である。

2. 研究の目的

前述のような研究背景に基づき熱電材料としてクラスレート半導体の実用化を目指して、筆者らの従来の熱電材料研究で得た知見も踏まえつつ、本研究では応用上の観点から熱電科学および社会的影響と波及効果も高く意義があると考えられるシリコン (Si) 系クラスレート半導体を中心に熱電性能向上のための材料設計と熱電特性の最適化に関する基礎的知見を得ることを目的とする。具体的には、クラスレート結晶構造の高い自由度に着目したホストおよびゲストの元素置換による結晶構造の操作・制御とその熱電物性への効果について明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究では工学応用を踏まえ、主に Si クラスレートの多結晶焼結体において種々の元素置換を行い、その熱電物性への効果について検討した。出発原料を先ずアーク溶融して化合物を合成し、それを粉末化したものを放電プラズマ焼結する方法により高密度の多結晶体を作製した。各種元素置換については、クラスレートのもつ結晶構造の特徴に着目し、主に以下の 2 つの観点から検討した。

(1) ホスト元素置換効果: 共有結合多面体格子ネットワークからなるホストが電子構造の骨格を形成し、よってキャリア輸送を主に支配すると考えられる。したがって、熱電材料に適した電子構造へ変調・制御するための種々の元素置換を行い、ゼーベック係数、キャリア移動度等への効果を調べた。筆者らは、従来の研究において Ge クラスレートにおいてホストを遷移金属元素置換するとゼーベック係数が増加する効果があることを発見している。この研究成果を発展させて Ge クラスレートとの比較実験と共に遷移金属元素置換の効果を Si クラスレートにおいても実験検証した。

(2) ゲスト元素置換効果: Ge 系よりも Si 系クラスレートはデバイ温度が高いため、熱伝導度の低減が課題である。クラスレートではゲスト原子の rattling 現象によりフォノンの伝播が抑制されることが、非常に低い格子

熱伝導度の主因と考えられている。よって、ゲスト原子と格子フォノンとの相互作用（フォノンの散乱）に着目し、ゲスト原子を種々の元素で置換し、熱伝導度（格子熱伝導度）への影響を調べた。また、ゲスト置換によるゼーベック係数、移動度等のキャリア輸送特性への影響についても検討した。

4. 研究成果

(1) ホスト 6c サイト置換効果

① Ge クラスレート

筆者らは従来から n 型 $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$ クラスレートにおける遷移金属元素によるホスト 6c サイト置換を系統的に調べており、本研究でさらに Ni 置換の効果について検討した。従来までの実験結果も含め、Ni 族 (Ni, Pd, Pt)・Cu 族 (Cu, Ag, Au) 元素ホスト 6c サイト置換により、 n 型のゼーベック係数（電子有効質量）が増加する効果があり、 $\text{Ni} < \text{Pd} < \text{Pt}$ 、 $\text{Cu} < \text{Ag} < \text{Au}$ の順に効果が大きくなる傾向があることがわかった。さらに、キャリア緩和時間を評価したところ、 $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$ よりも遷移金属元素置換化合物の緩和時間が増加、つまりホスト 6c サイト置換によりキャリア散乱が低下することが判明した。本研究によって、遷移金属元素によるホスト置換は有効質量が増加する効果に加えて緩和時間が増加する効果があり、熱電物性を向上させる上で有利であることを明らかにした。

② Si クラスレート

Ge クラスレートにおける効果を踏まえて、Si クラスレートにおいて固溶率の高い Au について置換効果を検討した。 $\text{Ba}_8\text{Au}_x\text{Ga}_y\text{Si}_{46-x-y}$ において熱電特性へのホスト Au 置換効果について調べた。 $\text{Ba}_8\text{Ga}_y\text{Si}_{46-y}$ では Ga 組成を変化させてキャリア補償を行っても n 型のみで p 型はできないが、 $\text{Ba}_8\text{Au}_x\text{Ga}_y\text{Si}_{46-x-y}$ では Au 組成 x が $x=0-3$ の範囲では n 型で $x=4-6$ では p 型となることを見出した。 n 型の組成範囲では、Au 置換によってゼーベック係数が増加する効果があり、有効質量は、 $\text{Ba}_8\text{Ga}_y\text{Si}_{46-y}$ では約 $1.5m_0$ に対して $\text{Ba}_8\text{Au}_x\text{Ga}_y\text{Si}_{46-x-y}$ では約 $2.5m_0$ と増加することがわかった。このように本研究によって Ge クラスレートと同様の効果が Si クラスレートにおいても発現することを実証した。

(2) ゲスト置換効果

① $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Si}_{30}$ 系クラスレートにおける希土類元素ゲスト置換によるフォノン物性への効果

本研究では Ba ゲストを Sr（比較実験）と Eu で一部元素置換した $\text{Ba}_{8-x}\text{A}_x\text{Ga}_{16}\text{Si}_{30}$ (A=Sr, Eu) 化合物を作製し、その結晶構造パラメータの精密化と熱電特性の評価を行った。リートベルト解析による精密化の結果、Sr と Eu はゲスト 2a サイト（ホスト 12 面体構造の中）を優先的に占有し、2a サイトにおける原子変

位パラメータは $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Si}_{30}$ や Sr 置換の場合と比べて Eu 置換の場合大きいことがわかった。格子熱伝導度は Eu ゲスト置換で大きく減少する可能性があることがわかった。結晶構造解析の結果と格子熱伝導度・比熱・音速の測定結果からフォノンの散乱機構について考察し、6d サイト（ホスト 14 面体構造の中）の Ba のみならず 2a サイトにおける Eu の rattling がフォノンの散乱に寄与している可能性が示唆された。このように本研究によって、Si クラスレートにおける希土類元素 Eu ゲスト置換は格子熱伝導度の低下効果のあることを国内外で初めて発見し、熱電物性の向上に繋がる有益な効果を見出した。

② ホストを遷移金属元素で置換した化合物系におけるゲスト置換による熱電特性への効果

本研究では主に n 型 $\text{Ba}_{8-x}\text{Eu}_x\text{Cu}_y\text{Si}_{46-y}$ 系および n 型 $\text{Ba}_6\text{A}_2\text{AuGa}_{13}\text{Si}_{32}$ (A=Sr, Eu) について検討した。その結果、どちらの化合物系においても Sr・Eu ゲスト置換によってゼーベック係数が増加する効果のあることが示唆された。そこで、Si クラスレートの電子構造計算を実施して元素置換の効果を検討したところ、ホストの Au 置換およびゲストの Sr・Eu 元素置換のいずれも伝導帯底付近のエネルギー分散関係に影響を及ぼすことが判明した。つまり、状態密度が増加すること、その結果ゼーベック係数が増加する効果が期待できることが判明した。さらに $\text{Ba}_6\text{A}_2\text{AuGa}_{13}\text{Si}_{32}$ (A=Sr) 系において熱電特性のキャリア濃度依存性をシミュレーションした結果、キャリア濃度を最適化すれば熱電性能が高温側で向上 (ZT 約 0.6) することが予測された。以上のように、従来までクラスレートにおいてはゲストの“rattling”散乱が低い熱伝導度の主因とされ、ゲストとフォノン物性との関係が重視されてきたが、本研究によって、ゲスト元素置換によってもキャリア輸送を担う電子構造を変調して熱電物性の制御が可能であることを明らかにした。

以上、本研究の主な成果について述べた。従来、クラスレート化合物の異常に低い熱伝導度を理解する上で、ゲスト-ホスト間相互作用とフォノン物性との関連が重視されてきた。しかし本研究から、熱電応用に向けて、ホストおよびゲスト置換によって電子構造を変調してキャリア輸送特性が制御可能であり、またゲスト置換元素の選択によりフォノンの散乱を増強できる可能性のあることがわかった。今後、この研究を発展させて熱電性能の向上に繋がるゲスト・ホスト制御したクラスレート材料の合成と熱電特性の最適化を進め、さらには熱電デバイス開発へ展開したいと考えている。

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5件)

1. Hiroaki Anno, Takahiro Nakabayashi, and Masahiro Hokazono, "Effect of Strontium and Europium Substitutions on Thermoelectric Properties in Silicon-Based Clathrate Compounds," *Advances in Science and Technology*, Vol. 74, (2010) pp. 26-31. [査読無]
2. K. Koga, K. Suzuki, M. Fukamoto, H. Anno, T. Tanaka and S. Yamamoto, "Electronic Structure and Thermoelectric Properties of Si-Based Clathrate Compounds," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 38, 1427-1432 (2009). [査読有]
3. 阿武宏明 : 「ナノラトリング半導体 Nano-rattling Semiconductors」, *機能材料*, Vol. 29, pp.17-24 (2009). [査読無]
4. H. Anno, K. Suzuki, K. Koga, and K. Matsubara, "Effect of Au substitution on thermoelectric properties of silicon clathrate compounds," *IEEE Proceedings of The XXVI International Conference on Thermoelectrics (ICT2007)*, IEEE Catalog No. CFP07404, Jeju Island, Korea, (3-7, June, 2007) pp. 243-246. [査読有]
5. Kenji Koga, Hiroaki Anno, Koji Akai, Mitsuru Matsuura, and Kakuei Matsubara, "First-Principle Study of Electronic Structure and Thermoelectric Properties for Guest Substituted Clathrate Compounds $Ba_8R_2Au_6Ge_{40}$ (R=Eu or Yb)," *Materials Transactions*, Vol. 48, 2108-2113 (2007). [査読有]

[学会発表] (計37件)

1. 中林 貴大, 外園 昌弘, 阿武 宏明, 巴 要師, 河本 邦仁 : 「ゲスト置換 $Ba_{8-x}A_xGa_{16}Si_{30}$ (A=Sr, Eu; $x=0-2$) クラスレーターの構造のおよび熱電的特性」, 第71回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (2010年秋季, 長崎大学, 文教キャンパス), 15p-P7-8, 09-068 (2010. 9.15).
2. 外園 昌弘, 中林 貴大, 阿武 宏明 : 「遷移金属元素置換クラスレーターの結晶構造の評価」, 第71回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (2010年秋季, 長崎大学, 文教キャンパス), 15p-P7-9, 09-069 (2010. 9.15).
3. 中林 貴大, 外園 昌弘, 阿武 宏明, 巴 要師, 河本 邦仁: 「 $Ba_8Ga_{16}Si_{30}$ 系クラスレーターにおけるゲスト元素置換と熱電特性 II」, 第7回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2010) 予稿集 (東京大学本郷キャン

- パス弥生講堂), PS-1, p.51 (2010. 8.19-20).
4. 外園昌弘, 中林貴大, 赤井光治, 阿武宏明 : 「遷移金属置換クラスレーターの結晶構造精密化と熱電特性評価」, 第7回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2010) 予稿集 (東京大学本郷キャンパス弥生講堂), S2-2, p.7 (2010. 8.18).
5. 阿武宏明, 「ナノ構造・組織制御による新規熱電材料の開発」, 第7回先進材料研究所シンポジウム設立5周年記念講演要旨集 (山口東京理科大学) O-5, p.8 (2010. 7.3).
6. H. Anno, T. Nakabayashi, and M. Hokazono, "Effect of Strontium and Europium Substitutions on Thermoelectric Properties in Silicon-Based Clathrate Compounds", *ABSTRACTS, 5th Forum on New Materials, CIMTEC2010, International Conference on Modern Materials & Technologies, Montecatini Terme, Tuscany, Italy (June 13-18, 2010)*, FE-2:L15, p.50, (June 16).
7. H. Anno, T. Nakabayashi, S. Kunimitsu and M. Hokazono, "Thermoelectric properties of silicon clathrates containing europium: $Ba_{8-x}Eu_xGa_{16}Si_{30}$ ($x=0-4$) nominal compositions," *Abstracts Book, 29th International Conference on Thermoelectrics (ICT2010)*, Shanghai, China, (30 May-3 June, 2010), P2-39, p.183.
8. 中林 貴大, 外園 昌弘, 阿武 宏明 : 「 $Ba_{8-x}Eu_xGa_{16}Si_{30}$ クラスレーターの結晶構造および熱電特性の評価」, 第57回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (東海大学, 湘南キャンパス), 19p-ZC-4, p.09-083 (2010. 3. 19).
9. 染井 吉野, 外園 昌弘, 中林 貴大, 阿武 宏明 : 「クラスレート熱電半導体の粉末 X線回折法による構造解析」第10回液晶研究所シンポジウム・第6回先進材料研究所シンポジウム・合同シンポジウム講演要旨集 (山口東京理科大学), P-32, p.36 (2010. 3. 10).
10. 國光 進, 中林 貴大, 外園 昌弘, 阿武 宏明 : 「シリコンクラスレートにおける希土類元素ゲスト置換と熱電特性の評価」第10回液晶研究所シンポジウム・第6回先進材料研究所シンポジウム・合同シンポジウム講演要旨集 (山口東京理科大学), P-33, p.37 (2010. 3. 10).
11. 阿武宏明, 外園昌弘, 中林貴大 : 「クラスレート半導体におけるゲスト・ホスト置換による電子構造および熱電特性の変調」, 粉体粉末冶金協会講演概要集平成21年度秋季大会 (第104回講演大会) (名古屋国際会議場 2号館), 1-23A, p.35 (2009.10.27)
12. 中林貴大, 外園昌弘, 立川博章, 阿武宏明 : 「ゲスト置換 $Ba_8Ga_{16}Si_{30}$ 系クラスレー

- トの作製とその熱電特性」, 第 70 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (富山大学, 五福キャンパス), 8p-ZK-4, p.235, (2009.9.8) .
13. 外園昌弘, 中林貴大, 阿武宏明: 「Ni 置換 Ge クラスレート化合物の作製とその熱電特性」, 第 70 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (富山大学, 五福キャンパス), 8p-ZK-5, p.236, (2009.9.8) .
 14. 外園昌弘, 中林貴大, 阿武宏明: 「Ge 系クラスレート化合物の熱電特性に及ぼす Ni 置換効果」, 第 6 回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2009) 予稿集 (東北大学, 青葉山キャンパス), PS-24, p.64, (2009.8.10-11)
 15. 中林貴大, 外園昌弘, 立川博章, 阿武宏明: 「Ba₈Ga₁₆Si₃₀ 系クラスレートにおけるゲスト元素置換と熱電特性」, 第 6 回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2009) 予稿集 (東北大学, 青葉山キャンパス), PS-26, P65, (2009.8.10-11)
 16. 外園昌弘, 中林貴大, 阿武宏明: 「半導体クラスレートの熱電特性に及ぼす遷移金属元素置換効果」, 2009 年度応用物理学会中国四国支部、若手半導体研究会講演予稿集 (広島大学西条共同研修センター), (2009.8.1-2)
 17. 中林貴大, 外園昌弘, 立川博章, 阿武宏明: 「ゲスト元素置換 Si 系クラスレート熱電半導体の作製と評価」, 応用物理学会中国四国支部、日本物理学会中国支部・四国支部、日本物理教育学会中国四国支部、2009 年度支部学術講演会講演予稿集 (広島大学, 東広島キャンパス, 先端物質科学研究科), Bp1-4, p.47, (2009.8.1)
 18. 外園昌弘, 中林貴大, 阿武宏明: 「Type-I クラスレートの熱電特性に及ぼす遷移金属元素置換効果」, 応用物理学会中国四国支部、日本物理学会中国支部・四国支部、日本物理教育学会中国四国支部、2009 年度支部学術講演会講演予稿集 (広島大学, 東広島キャンパス, 先端物質科学研究科), Bp1-5, p. 48, (2009.8.1)
 19. H. Anno, K. Okita, S. Harima, T. Nakabayashi, and M. Hokazono, “Guest substitution and thermoelectric properties in silicon clathrate compounds”, Book of Abstracts, 28th International Conference / 7th European Conference on Thermoelectrics (ICT/ECT2009), Freiburg, Germany (July 26-30, 2009), PT-116, p. 201 (July 27-28).
 20. 立川博章, 播磨宗史, 阿武宏明: 「Ba₈Ga₁₆Si₃₀ 系クラスレートの作製とその熱電特性の評価」, 第 9 回液晶研究所シンポジウム・第 5 回先進材料研究所シンポジウム・合同シンポジウム講演要旨集 (山口東京理科大学), P-32, p.57 (2009. 3. 9).
 21. 播磨宗史, 立川博章, 阿武宏明: 「Ba₈Al₁₆Si₃₀ クラスレートにおけるゲスト元素置換および熱電特性」, 第 9 回液晶研究所シンポジウム・第 5 回先進材料研究所シンポジウム・合同シンポジウム講演要旨集 (山口東京理科大学), P-33, p.58 (2009. 3. 9).
 22. H. Anno, S. Noguchi, K. Suzuki and K. Koga, “Thermoelectric Properties of Ba₈Au₂Ga_xGe_{44-x} Clathrate Compounds with Various Carrier Concentrations”, Abstracts CD of The International Union of Materials Research Societies (IUMRS) International Conference in Asia 2008 (IUMRS-ICA 2008), Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, (December 9-13, 2008), UP-12, [December 10].
 23. 古賀健治, 深本真史, 鈴木康司, 阿武宏明: 「Type-I Si 系クラスレート化合物の電子構造と熱電特性」, 第 69 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (中部大学), 3p-Y-3, p. 212 (2008. 9.3).
 24. 楠田真太, 古賀健治, 播磨宗史, 立川博章, 阿武宏明: 「Ba₈Al₁₆Si₃₀ 系クラスレートの熱電特性に及ぼす熱処理効果」, 第 5 回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2008) 予稿集 (早稲田大学, 大久保キャンパス), P-28, p. 72, (2008. 8. 21-22).
 25. K. Koga, K. Suzuki, M. Fukamoto, and H. Anno, “Electronic Structure and Thermoelectric Properties of Si-based Clathrate Compounds,” Book of Abstracts XXVII International Conference on Thermoelectrics (ICT2008), Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA (3-7, August, 2008), P41, p. 118, [5-7, August].
 26. 野口信次, 鈴木康司, 古賀健治, 阿武宏明: 「Ba₈Au₂Ga_xGe_{44-x} クラスレートの作製とその熱電特性」, 第 55 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (日本大学理工学部, 船橋キャンパス), 30a-P15-1, p.273 (2008. 3. 30).
 27. 沖田一樹, 古賀健治, 阿武宏明: 「Ba_{8-x}Eu_xCu_ySi_{46-y} クラスレート化合物の熱電特性」, 第 55 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (日本大学理工学部, 船橋キャンパス), 30a-P15-2, p.274 (2008. 3. 30).
 28. 鈴木康司, 野口信次, 古賀健治, 阿武宏明: 「Si 系クラスレート化合物の熱電特性に及ぼす元素置換効果」, 第 55 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (日本大学理工学部, 船橋キャンパス), 30a-P15-3, p.274 (2008. 3. 30).
 29. 古賀健治: 「ゲスト置換 IV 族クラスレート化合物の電子構造とその熱電特性」, 第

- 8 回液晶研究所シンポジウム・第 4 回先進材料研究所シンポジウム・合同シンポジウム講演要旨集(山口東京理科大学), O-4, p.19 (2008. 3. 17).
30. 楠田真太, 古賀健治, 阿武宏明:「環境半導体 Si クラスレートの作製とその熱電特性」, 第 8 回液晶研究所シンポジウム・第 4 回先進材料研究所シンポジウム・合同シンポジウム講演要旨集(山口東京理科大学), P-25, p.48 (2008. 3. 17).
31. 鈴木康司, 古賀健治, 阿武宏明:「貴金属元素置換クラスレートの創製とその熱電的特性」, 第 8 回液晶研究所シンポジウム・第 4 回先進材料研究所シンポジウム・合同シンポジウム講演要旨集(山口東京理科大学), P-26, p.49 (2008. 3. 17).
32. 野口信次, 古賀健治, 阿武宏明:「貴金属元素置換クラスレートにおける熱電特性の最適化」, 第 8 回液晶研究所シンポジウム・第 4 回先進材料研究所シンポジウム・合同シンポジウム講演要旨集(山口東京理科大学), P-27, p.50 (2008. 3. 17).
33. 沖田一樹, 古賀健治, 阿武宏明:「クラスレート熱電材料におけるゲスト置換と熱電特性の評価」, 第 8 回液晶研究所シンポジウム・第 4 回先進材料研究所シンポジウム・合同シンポジウム講演要旨集(山口東京理科大学), P-28, p.51 (2008. 3. 17).
34. 鈴木康司, 古賀健治, 阿武宏明, 松原覚衛:「Si 系クラスレート化合物におけるダブルゲスト充填効果」, 第 68 回応用物理学会学術講演会講演予稿集(北海道工業大学), 6p-ZK-2, p. 250 (2007. 9. 6).
35. 鈴木康司, 野田信次, 古賀健治, 阿武宏明, 松原覚衛:「ゲスト置換 Si クラスレートの作製とその熱電特性」, 第 4 回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2007) 予稿集(大阪大学, コンベンションセンター), P-7, p. 49 (2007. 8. 29-30).
36. 古賀健治, 阿武宏明, 赤井光治, 松浦満:「 $Ba_6A_2TM_6Ge_{40}$ (A=Sr, Eu, Yb, TM=Cu, Ag, Au)の電子構造とその熱電特性」, 第 4 回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2007) 予稿集(大阪大学, コンベンションセンター), P-11, p. 53 (2007. 8. 29-30).
37. H. Anno, K. Suzuki, K. Koga, and K. Matsubara, “Effect of Au substitution on thermoelectric properties of silicon clathrate compounds,” Abstract of The XXVI International Conference on Thermoelectrics (ICT2007), Jeju Island, Korea, (3-7, June, 2007), P-A-06, p. 72.

[図書] (計 2 件)

1. 阿武宏明:「ナノ構造制御によるクラスレート熱電変換材料の創製」, CERAMIC DATA BOOK 2009/10, 工業と製品:Vol. 37,

No.91, 工業製品技術協会(株式会社テクノプラザ), ISBN:4-905959-91-X, pp.70-73 (2009 年 12 月 8 日発行) 全 186 ページ.

2. 阿武宏明, 古賀健治:「熱電変換技術ハンドブック」, 第 2 章熱電変換材料, 2 節化合物半導体, 4 クラスレート化合物, 4.1 クラスレート化合物の高温熱電特性, 監修 梶川武信, 編集 舟橋良次, 阿武宏明, 鈴木亮輔, 寺崎一郎, 山本淳, (株式会社エヌ・ディー・エス, 東京, 2008 年 12 月 20 日) ISBN978-4-86043-257-7, pp107-122, 全 675 ページ.

[その他]

ホームページ等

<http://www.tus.ac.jp/ridai/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿武 宏明 (ANNO HIROAKI)

山口東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号: 6 0 2 7 9 1 0 6

(2) 研究分担者

古賀 健治 (KOGA KENJI)

山口東京理科大学・基礎工学部・助教

研究者番号: 1 0 4 2 3 3 8 6

分担期間: 平成 19 年 4 月 1 日～平成 20 年 10 月 20 日 (退職により辞退)