

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360285

研究課題名(和文)機能性発現を目指した磁性金属合金の強磁場中状態図

研究課題名(英文)The study on phase diagram of magnetic materials and alloys under high magnetic fields for development of new functional materials

研究代表者

小山 佳一 (Koyama, Keiichi)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70302205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円、(間接経費) 4,260,000円

研究成果の概要(和文)：強磁性体MnBiの強磁場中熱分析の結果について解析したところ、強磁性MnBi→常磁性Mn1.08Bi+液相への分解温度(約630 K @ゼロ磁場)が磁場45 Tで約90 K上昇する。Mn-Biの磁場18 Tの平衡状態図を実験的に完成させ、ゼロ磁場と大きく異なることを見出した。強磁場中の平衡状態図は本研究が初めてである。炭素鋼の強磁場中状態図を作成した。CALPHAD法に磁場中磁気エネルギーを取り込んだ計算手法を開発した。強磁場平衡状態図を基礎に強磁場による純良試料の作成に成功した。

研究成果の概要(英文)：Differential thermal analysis was carried out for ferromagnetic material MnBi in the temperature range 300-773K in magnetic fields up to 45 T. The decomposition temperature T_t (MnBi → Mn1.08Bi + liquid) increases from 632 K (at a zero field) to 714 K by applying a magnetic field of 45 T. In addition, the Bi-Mn phase diagram at 18 T was obtained, which quite different from that at a zero magnetic field. We also obtained the Fe-C steel phase diagram under high magnetic fields over 18 T. The thermodynamic calculations of the Bi-Mn binary phase diagram in high magnetic fields are carried out by the Computer Coupling of Phase Diagrams (CALPHAD) method. The calculated results show the significant change of the Bi-Mn phase diagram under magnetic fields, which were in good agreement with the experimental results of in-field thermal analysis performed by our research group.

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：強磁場 平衡状態図 磁場中合成 磁場制御 機能性材料

1. 研究開始当初の背景:

材料研究の最も重要で基礎となるのが、「状態図」である。状態図の一つ、「平衡状態図」は、複数元素からなる材料が、組成と温度の下でどのような相(状態)が安定に存在するかを示すもので、「材料開発の地図」と言われている。材料のミクロ・ナノ微細組織の創製、最先端デバイス材料や構造材料の研究においても、平衡状態図抜きに進めることは難しい。近年では高圧力環境を利用して、常圧下平衡状態図で見出されない状態の発見や新規材料の創成も行われてきた。このように特殊環境は、材料開発にとって重要な手段である。

磁場は、圧力や温度とともに、物質の状態を決める重要な環境である。しかし、磁場の材料合成への利用は、合金溶液の対流抑制や磁性体の配向・焼結などに限られていて、新規物質合成の手段には十分に利用されていない。それは、磁場 1 T (1 テスラ=地磁気の約 2 万倍) から得られるエネルギーは、温度に換算して 1-2K 程度しかなく、物質の平衡状態に大きく影響を与える環境になりえないと考えられてきた。また、10T を超える磁場は限られた施設でしか利用できず、人類は未だ強磁場下での「二元合金平衡状態図」を得ていない。

応募者は、これまで磁気一次相転移(強磁性と非磁性間の一次相転移)の強磁場(10T 以上)による影響を調べる過程で、MnBi 強磁性体の分解温度 T_t (MnBi→Mn_{1.08}Bi+液体 Bi) が磁場によって変化することを見出した。これは、スピン間の大きな磁気相互作用エネルギー(数 100 K 相当)によるもので、「強磁場を用いて強磁性スピン誘起をアシスト制御」できれば、磁場によって磁気的エネルギーが大きく減少し、物質中の全自由エネルギーが大きく変化する。つまり、磁場で磁性体の合成や分解温度を制御できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、磁性材料研究の未踏領域である「強磁場中状態図」を実験によって系統的に明らかにし、磁場利用構造・機能性材料開発の基礎を築くことである。当該期間で具体的成果を得るため、以下の項目について重点的に調べる。

(1) 3d 磁性合金の強磁場下二元平衡状態図の解明: Mn、Fe、Co、Ni を含む 2 元合金の磁場 20T 級の強磁場下平行状態図を明らかにする。

(2) 磁場による状態図制御機構解明: 上記合金の磁性元素を磁性・非磁性元素に一部置換した擬二元合金の磁場中相転移温度を評価。磁場による状態図制御機構について、磁気的相互作用変調のアプローチから解明する。

(3) 磁場中合成合金の磁場中基礎特性評価: (1) で作成した平衡状態図を基に、磁場中試料合成し、その基礎磁気・構造物性及

び機能性を比較・評価、機能性の発現の知見を得る。高機能化を見極めるために、得られた試料について、磁場中磁気・構造状態図(磁気・構造相図)を作成する。

(4) 高機能化のための最適磁場中熱処理条件開拓: (1) ~ (3) の結果を基に、高機能化のための最適磁場中熱処理条件を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究の目的を 4 年間で達成するために、試料を【A】Mn 系及び【B】Fe 系に絞り、以下の研究計画を進める。(1) 3d 磁性合金材料(二元、擬二元合金)を溶解法で合成。(2) ゼロ磁場中示差走査熱量測定、強磁場中示差熱分析、強磁場 X 線回折実験により代表的 3d 磁性合金磁場中状態図を作製。(3) 平行状態図計算プログラムを基に、磁気的エネルギーを考慮した状態図計算と実験結果の比較評価。(4) 強磁場中磁化測定等で基礎物性評価(相図作成)。(5) 以上を総合的に判断し、最適磁場中熱処理条件解明する。

4. 研究成果

(1) 3d 磁性合金の強磁場下二元平衡状態図の解明:

①世界最高磁場 45 T (テスラ) で行った強磁性体 MnBi の強磁場中熱分析の結果について解析したところ、強磁性 MnBi→常磁性 Mn_{1.08}Bi+液相への分解温度 T_t (約 630 K @ ゼロ磁場) が磁場 45 T で約 90 K 上昇することを見出した。(図 1)

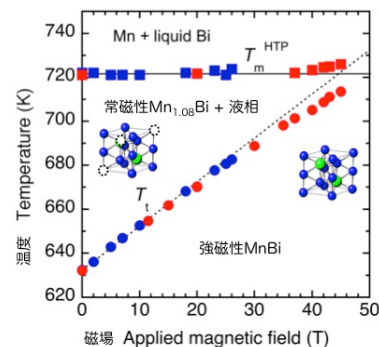


図 1 強磁性 MnBi→常磁性 Mn_{1.08}Bi+液相への分解温度 T_t の磁場変化。

②図 1 の結果をもとに、磁場 11.5T で 669K まで昇温→669K で 45T まで励磁(7T/分)→11.5T まで減磁(7T/分)で実験を行った結果、熱分析のシグナルは磁場に呼応した変化を示した。これは、磁場で物質の分解と合成を制御できる直接的証拠を得た。

③Mn-Bi の強磁場中熱分析によって、平衡状態図を作成した(図 2)。ゼロ磁場 a に比べ磁場 18 T の状態図 b で、強磁性 MnBi+液相の

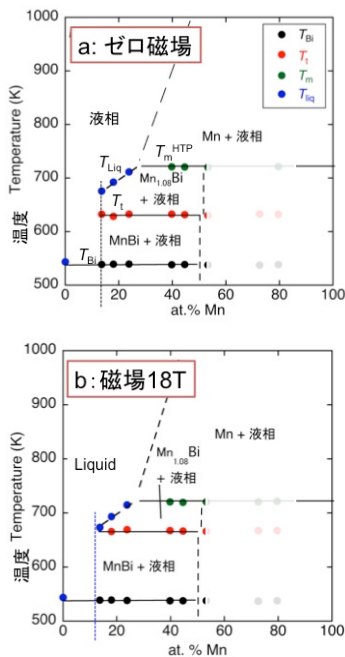


図2 Mn-Biの平衡状態図。a: ゼロ磁場、b: 磁場 18 T。

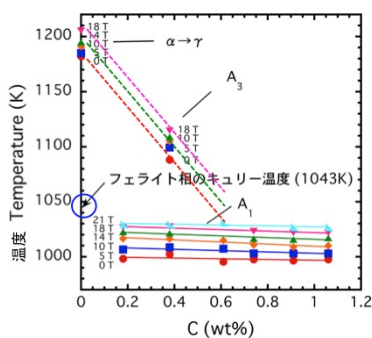


図3 炭素鋼 Fe-C の平衡状態図の磁場依存性。

領域が大きく広がっていることを見出した。このことは、ゼロ磁場に比べ、強磁場中では強磁性 MnBi の純良試料が合成されることを示唆する。実験による強磁場中平衡状態図の報告は本研究が初めてである。

④炭素鋼 Fe-C について、強磁場中熱分析を行い、強磁場中平衡状態図を明らかにした。(図3)

(2) 磁場による状態図制御機構解明:

①Mn-Bi系に Bi, Sb や Sn など非磁性第三元素を微量に添加した際の平衡状態について、極めて不安定であることが分かった。

②CALPHAD 法プログラムに磁場中の磁気エネルギー計算を組み込み、シミュレーションを行ったところ、Mn-Bi 系について、実験結果をよく再現できた。(図4) しかし、Fe-C 系

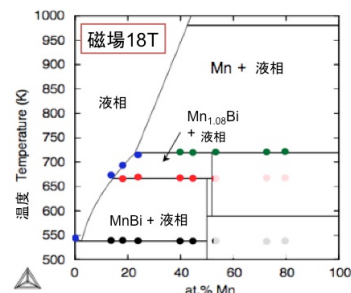


図4 Mn-Bi の磁場 18T 中の計算状態図。図中丸印は実験値。

については実験結果をよく再現できない。これは、Mn-Bi のように局在モデルの場合、磁気モーメントがよく再現でき、Fe系のような遍歴電子モデルの場合はその磁気モーメントの温度変化が計算できないことによる。しかし、Mn-Bi の結果は実験的に磁気モーメントの温度変化を高温まで精密に測定できれば、磁場中平衡状態が計算できることを示している。

(3) 磁場中合成合金の磁場中基礎特性評価:

①(1) で得た Mn-Bi 系の強磁場状態図をもとに、Mn 粉末と Bi 粉末を用いて温度 553 K で 24 時間の磁場中焼結を行った。その結果、ゼロ磁場の結果に比べ、磁場 15 T では、Bi の析出量が少なくかつ c 軸に結晶配向していることが明らかとなった。つまり、強磁場による磁気エネルギーの利得により、強磁性 MnBi の合成が促進されると同時に、一軸磁気異方性を持つ結晶の配向が実現している。

②磁場中 X 線評価装置を製作した。

③MnCoSb 系、MnFeSiGe 系、NiMnIn 系の磁場中 X 線により磁場中の結晶評価を行い、磁場中の相図を明らかにするとともに、磁場誘起結晶変態等を明らかにした。さらに、それらの関連物質について強磁場・高圧下での特性評価をし、機能性に関わる重要な知見を得た。

(4) 高機能化のための最適磁場中熱処理条件開拓:

①Mn-Bi 系で磁場中液相焼結については、温度 553 K 付近で最もよい結晶性と磁気特性を示した。

②Mn-Bi 系において、強磁場で固相-固相反応が促進されることを見出し、新たな磁石材料開発のプロセスを開発、特許出願を行った。

その他、本研究によって多くの重要な成果が得られ、下記のように論文、学会等で発表した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 18 件)

- ① 三井 好古、池原 佑基、高橋 弘紀、渡辺 和雄、小山 佳二、”強磁場中示差熱分析による Fe-C の $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態に対する強磁場効果”、熱測定 Vol.41、(2014)、pp.43-48 (査読有)
- ② K. Abematsu, R.Y. Umetsu, R. Kainuma, T. Kanomata, K. Watanabe and K. Koyama, “Structural and magnetic properties of magnetic shape memory alloy Ni₄₆Mn₄₁In₁₃ under magnetic fields”, Mater. Trans., Vol.55, (2014), pp.477-481 (査読有)
- ③ Y. Yoshimine, D. Mitsunaga, H. Orihashi, D. Shimada, M. Hiroi, R. Onodera, S. Kimura, K. Takahashi and K. Koyama, “Magnetic and electrical properties of Mn_{2-x}Ni_{1+x}Sb”, IEEE Trans. Magn, Vol.50, (2014), pp.1001204-(4) (査読有)
- ④ Y. Matsumoto, H. Orihashi, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, M. Hiroi, K. Koyama, “Magnetic field effect on magnetic and electrical properties of Mn_{2-x}Cu_xSb”, IEEE Trans. Magn., Vol.50, (2014), pp.100074-(4) (査読有)
- ⑤ K. Koyama, D. Shimada, H. Orihashi, D. Mitsunaga, M. Hiroi, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, R. Onodera, S. Kimura, and K. Takahashi, “Magnetic properties of Mn₂Sb_{1-x}Z_x (Z = Ge, Sn)”, Rep. Fac. Sci., Kagoshima Univ., Vol.46, pp.37-42 (2013) (査読無)
- ⑥ Y. Mitsui, Y. Ikehara, K. Watanabe, E.S. Choi, E.C. Palm and K. Koyama, “Thermal analysis on MnBi in high magnetic fields up to 45 T”, J. Korean Phys. Soc., Vol.62, (2013), pp.1769-1772 (査読有)
- ⑦ Y. Mitsui, K. Oikawa, K. Koyama and K. Watanabe, “Thermodynamic assessment for the Bi-Mn binary phase diagram in high magnetic fields”, J. Alloys Comp., Vol.577, (2013), pp.315-319 (査読有)
- ⑧ M. Hiroi, K. Uchida, I. Shigeta, M. Ito and K. Koyama, “Antiferromagnetic transition in Ru₂CrSi in magnetic fields”, J. Korean Phys. Soc., Vol.62, (2013), pp.2068-2072 (査読有)
- ⑨ D. Shimada, H. Orihashi, D. Mitsunaga, M. Ito, M. Hiroi and K. Koyama, “Magnetic properties of Mn₂Sb_{1-x}Ge_x (0.05 ≤ x ≤ 0.2) in high magnetic fields”, J. Korean Phys. Soc., Vol.62, (2013), pp.747-750 (査読有)
- ⑩ H. Orihashi, M. Hiroi, Y. Mitsui, K. Takahashi, K. Watanabe, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko and K. Koyama, “Magnetic and Structural Properties of Mn_{1.8}Co_{0.2}Sb under High Magnetic Fields”, Mater.

Trans., Vol.54, (2013), pp.969-973 (査読有)

- ⑪ K. Koyama, K. Watanabe, O. Tegus, E. Brück, K.H.J. Buschow, F.R. de Boer, “X-Ray Powder Diffraction Studies on MnFeP_{0.78}Ge_{0.22} in High Magnetic Fields”, J. Low Temp. Phys., Vol.170, No.5-6, (2013), pp.279-284 (査読有)
- ⑫ Y. Mitsui, K. Koyama and K. Watanabe, “Bi-Mn Binary Phase Diagram in High Magnetic Fields”, Mater. Trans., Vol.54, No.2, (2013), pp.242-245 (2013) (査読有)
- ⑬ K. Watanabe, Y. Mitsui, K. Koyama, “Heat-treatment processing for MnBi in high magnetic fields”, Advances in Science and Technology, Vol.78, (2013), pp.19-24 (査読有)
- ⑭ 折橋広樹、満永大輔、廣井政彦、三井好古、高橋弘紀、渡辺和雄、松林和幸、上床美也、小山佳二、”Mn_{2-x}Co_xSb (x = 0.17, 0.2)の強磁場中磁気特性”、鹿児島大学理学部紀要, Vol.45, (2012), pp.43-49 (査読無)
- ⑮ K. Koyama, Y. Mitsui, E.S. Choi, Y. Ikehara, E. Palm, and K. Watanabe, “Controlled Equilibrium State of Ferromagnetic MnBi by High Magnetic Fields”, Proceedings of the 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and their Applications, (Nagasaki, 2012), (2012), pp.110-113 (査読無)
- ⑯ 折橋広樹、満永大輔、廣井政彦、三井好古、高橋弘紀、渡辺和雄、小山佳二、”強磁場 X 線回折実験による Mn_{1.8}Co_{0.2}Sb の磁場中結晶評価”、日本金属学会誌, Vol.76, No.4, (2012), pp.246-250 (査読有)
- ⑰ Y. Mitsui, K. Koyama, K. Takahashi and K. Watanabe, “Development of an x-ray diffraction camera used in magnetic fields up to 10 T”, Rev. Sci. Instrum., Vol.82, (2011), pp.125104(1)-125104(6) (査読有)
- ⑱ K. Koyama, Y. Mitsui, E.S. Choi, Y. Ikehara, E.C. Palm, K. Watanabe, “Change of the equilibrium state of ferromagnetic MnBi by high magnetic fields”, J. Alloys. Comp., Vol.509, (2011), pp.L78-L80 (査読有)

[学会発表] (計 38 件)

- ① K. Koyama, Y. Mitsui, K. Oikawa and K. Watanabe, “Magnetic Field Effect on the Equilibrium Diagram of Bi-Mn Binary System”, 10th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2014 年 4 月 4-7 日 (ギリシヤ)
- ② 三井好古、梅津理恵、渡辺和雄、小山佳

- 二, “MnBi の強磁場中合成”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27-30 日(平塚)
- ③ 松本佳大, 小山佳二, 松林和幸, 上床美也, “Mn₂Sb システム磁性体の高圧下における磁気状態”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27-30 日(平塚)
- ④ 三井好古, 梅津理恵, 小山佳二, 渡辺和雄, “強磁場中固相反応焼結による MnBi の作製”, 日本金属学会 2014 年春期講演大会, 2014 年 3 月 21-23 日(東京)
- ⑤ アベ松賢一, 小山佳二, 三井好古, 梅津理恵, 高橋弘紀, “強磁場中液相焼結による MnBi の作製と特性”, 日本金属学会 2014 年春期講演大会, 2014 年 3 月 21-23 日(東京)
- ⑥ アベ松賢一, 三井好古, 梅津理恵, 小山佳二, “強磁場中液相焼結による MnBi の合成”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014 年 3 月 17-20 日(相模原)
- ⑦ アベ松賢一, 梅津理恵, 貝沼亮介, 鹿又武, 渡辺和雄, 小山佳二, “磁場中での磁場誘起形状記憶合金 Ni₄₆Mn₄₁In₁₃ の構造特性”(講演奨励賞受賞記念講演), 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014 年 3 月 17-20 日(相模原)
- ⑧ アベ松賢一, 梅津理恵, 貝沼亮介, 鹿又武, 渡辺和雄, 小山佳二, “メタ磁性形状記憶合金 Ni₄₆Mn₄₁In₁₃ の磁場中結晶構造評価”, 応用物理学会, 2013 年 9 月 16-20 日(京田辺)
- ⑨ 松本佳大, 折橋広樹, 廣井政彦, 小山佳二, 松林和幸, 上床美也, “Mn_{2-x}Cu_xSb の強磁場下における磁気特性及び電気的特性”, 日本金属学会, 2013 年 9 月 17-19 日(金沢)
- ⑩ 吉峰裕貴, 満永大輔, 廣井政彦, 小野寺礼尚, 高橋弘紀, 小山佳二, “ホイスラー合金 Mn_{2-x}Ni_{1+x}Sb の強磁場中電気的及び磁気的特性”, 日本金属学会, 2013 年 9 月 17-19 日(金沢)
- ⑪ K. Abematsu, R. Y. Umetsu, R. Kainuma, T. Kanomata, K. Watanabe, K. Koyama, “Structural properties of magnetic shape memory alloy Ni₄₆Mn₄₁In₁₃ under magnetic fields”, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 2013 年 7 月 21-25 日(台湾)
- ⑫ D. Mitsunaga, Y. Yoshimine, H. Orihashi, D. Shimada, M. Hiroi, R. Onodera, K. Takahashi, K. Koyama, “Magnetic and electrical properties of Mn_{2-x}Ni_{1+x}Sb”, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 2013 年 7 月 21-25 日(台湾)
- ⑬ Y. Mitsui, K. Koyama, K. Oikawa, K. Watanabe, “Bi-Mn Phase Diagram in High Magnetic Field”, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 2013 年 7 月 21-25 日(台湾)
- ⑭ K. Koyama, D. Shimada, H. Orihashi, D. Mitsunaga, M. Hiroi, “Magnetic properties of Mn₂Sb_{1-x}Z_x (Z = Ge, Sn)”, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 2013 年 7 月 21-25 日(台湾)
- ⑮ Y. Matsumoto, H. Orihashi, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, M. Hiroi, K. Koyama, “Magnetic field effect on magnetic and electrical properties of Mn_{2-x}Cu_xSb”, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 2013 年 7 月 21-25 日(台湾)
- ⑯ 折橋広樹, 松林和幸, 上床美也, 小山佳二, “圧力下における Mn_{2-x}Co_xSb の磁気緩和”, 日本物理学会, 2013 年 3 月 26-29 日(東広島)
- ⑰ 島田大輔, 折橋広樹, 満永大輔, 廣井政彦, 小山佳二, 小野寺礼尚, 三井好古, 木村尚次郎, 高橋弘紀, 池田大地, 安達義也, “Mn₂Sb_{1-x}Z_x (Z = Ge, Sn, 0.05 ≤ x ≤ 0.2) の磁気特性”, 日本金属学会春期講演大会, 2013 年 3 月 26-29 日(東京)
- ⑱ 島田大輔, 折橋広樹, 満永大輔, 小山佳二, 松林和幸, 上床美也, 小野寺礼尚, 高橋弘紀, “Mn₂Sb_{1-x}Ge_x (0.05 ≤ x ≤ 0.2) の磁気特性”, 日本物理学会, 2012 年 9 月 18-21 日(横浜)
- ⑲ 島田大輔, 折橋広樹, 満永大輔, 伊藤昌和, 廣井政彦, 小山佳二, 小野寺礼尚, 高橋弘紀, 松林和幸, 上床美也, “Mn₂Sb_{1-x}Ge_x (0.05 ≤ x ≤ 0.2) の強磁場下磁気特性”, 日本金属学会秋期大会, 2012 年 9 月 17-19 日(松山)
- ⑳ 折橋広樹, 小山佳二, 松林和幸, 上床美也, “Mn_{2-x}Co_xSb の磁気緩和”, 日本金属学会秋期大会, 2012 年 9 月 17-19 日(松山)
- 21 島田大輔, 折橋広樹, 満永大輔, 伊藤昌和, 廣井政彦, 松林和幸, 上床美也, 小野寺礼尚, 高橋弘紀, 小山佳二, “強磁場下における Mn₂Sb_{1-x}Ge_x (0.05 ≤ x ≤ 0.2) の磁気特性”, 応用物理学会秋季大会, 2012 年 9 月 11-14 日(松山)
- 22 折橋広樹, 松林和幸, 上床美也, 小山佳二, “圧力下における Mn_{2-x}Co_xSb の磁気特性”, 応用物理学会秋季大会, 2012 年 9 月 11-14 日(松山)
- 23 K. Koyama, Y. Mitsui, Y. Ikehara, K. Watanabe, E.S. Choi, E.C. Palm, “Differential Thermal Analysis on MnBi in High Magnetic Fields up to 45 T”, The 19th International Conference on Magnetism, 2012 年 7 月 8-13 日(韓国)
- 24 D. Shimada, H. Orihashi, D. Mitsunaga, M. Ito, M. Hiroi, R. Onodera, K. Takahashi, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, K. Koyama,

- Magnetic Properties of $Mn_2Sb_{1-x}Ge_x$ ($0.05 \leq x \leq 0.2$) in High Magnetic Field, The 19th International Conference on Magnetism, 2012年7月8-13日(韓国)
- 25 H. Orihashi, M. Hiroi, Y. Mitsui, K. Takahashi, K. Watanabe, K. Koyama, “High Field X-ray Diffraction Measurements of $Mn_{1.8}Co_{0.2}Sb$ ”, The 19th International Conference on Magnetism, 2012年7月8-13日(韓国)
- 26 K. Koyama, K. Watanabe, O. Tegus, E. Bruck, K.H.J. Buschow, F.R. de Boer, “X-ray Powder Diffraction Studies on $MnFeP_{1-x}Z_x$ ($Z = As, Si, Ge$) in High Magnetic Fields”, The 10th International Conference on Research in High Magnetic Fields, 2012年7月3-6日(中国)
- 27 K. Koyama, “PHASE DIAGRAM OF MN-BI IN HIGH MAGNETIC FIELD” (招待講演), 5th International Workshop on Materials Analysis and Processing in Magnetic Fields, 2012年5月13-17日(フランス)
- 28 折橋 広樹、小山 佳一、松林 和幸、上床 美也, “ $Mn_{2-x}Co_xSb$ の圧力下磁化測定”, 日本金属学会, 2012年3月28-30日(横浜)
- 29 折橋広樹, 小山佳一, 松林和幸, 上床美也, “圧力下磁化測定による $Mn_{2-x}Co_xSb$ のカイネティックアレスト効果の研究”, 日本物理学会, 2012年3月24-27日(三田)
- 30 小山佳一, “磁性金属材料の強磁場中状態図”, 日本結晶成長学会・バルク成長分科会, 2012年2月24日(仙台)
- 31 小山佳一、三井好古、渡辺和雄、E. S Choi、E. Palm, “強磁性体 MnBi の強磁場中示差熱分析”, 日本金属学会, 2011年11月7-9日(宜野湾)
- 32 折橋広樹、小山佳一、満永大輔、三井好古、高橋弘紀, “強磁場 X 線回折実験による $Mn_{1.8}Co_{0.2}Sb$ の磁場中結晶評価”, 日本金属学会, 2011年11月7-9日(宜野湾)
- 33 三井好古, 小山佳一, 及川勝成, 渡辺和雄, “強磁場中示差熱分析測定による Mn-Bi 二元系の強磁場中平衡状態図の作成”, 日本磁気科学会, 2011年9月26-28日(東京)
- 34 折橋広樹, 小山佳一, 満永大輔, 三井好古, 高橋弘紀, “強磁場 X 線回折実験による $Mn_{1.8}Co_{0.2}Sb$ のカイネティックアレスト効果”, 日本磁気科学会, 2011年9月26-28日(東京)
- 35 小山佳一、池原佑基、高橋弘紀、木村尚次郎、古原忠、宮本吾郎、渡辺和雄, “Fe-C 二元合金の強磁場中示差熱分析”, 日本鉄鋼協会, 2011年9月20-22日(大阪)
- 36 小山佳一, 湯川記念講演: “超高磁場下

における金属材料の特性評価”(招待講演), 日本鉄鋼協会・日本金属学会中国支部合同公演大会, 2011年8月8-9日(岡山)

- 37 K. Koyama, Y. Mitsui, E. S. Choi, Y. Ikehara, E. C. Palm, and K. Watanabe, “Differential thermal analysis for MnBi in high magnetic field up to 45 T” (招待講演), International Conference of AUMS, 2010年12月5-8日(韓国)
- 38 小山 佳一、三井 好古、E.S. Choi、池原 佑基、E. Palm、渡辺和雄, “MnBi の45T 定常強磁場下示差熱分析”, 日本応用物理学会, 2010年9月14-17日(長崎)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 永久磁石の製造方法

発明者: 三井好古、梅津理恵、渡邊和雄、
小山佳一

権利者: 同上

種類: 特許願

番号: 特願 2013-197699

出願年月日: 25年9月25日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.sci.kagoshima-u.ac.jp/~koyama/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小山 佳一 (KOYAMA, Keiichi)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 70302205

(2) 研究分担者

伊藤 昌和 (ITO, Masakazu)

鹿児島大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 40294524

研究分担者

廣井 政彦 (HIROI, Masahiko)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 80212174