

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04547

研究課題名(和文) 磁場中状態図と強磁場反応促進効果を利用した強磁性磁材料の創出

研究課題名(英文) The study on equilibrium phase diagram under magnetic fields and preparation of ferromagnetic materials by magnetic field-induced reaction effects

研究代表者

小山 佳一 (KOYAMA, Keiichi)

鹿児島大学・理工学域理学系・教授

研究者番号：70302205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：強磁場中状態図を評価と磁気エネルギーの利得で進む磁場化学反応促進効果について、次の主な成果を得た。(1)世界最高磁場19Tでの磁場中熱処理急冷炉を開発した。(2)MnBiの磁場化学反応促進効果の起源は主に強磁性相核生成数の増加による。(3)磁場勾配を利用すれば0.5T程度でもMnBiの磁気分離が可能と示唆された。(4)MnAlで磁場誘起非磁性-強磁性相変態の起源は、非磁性イプシロン相-強磁性タウ相変態促進とベータ相変態抑制による。(5)MnAlでCによるエプシロン相安定化を見出した。(6)MnAlZnで効率的タウ相磁場中合成法を開発した。(7)MnCuAlで結晶サイズの磁場抑制効果を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で、機能性磁性材料5種類の磁場効果を解明し、3件の磁場効果の起源を突き止めた。世界最高磁場中強磁性物質合成に成功した。磁場中平衡状態図の計算法の開発が進み、効率的に磁場中材料開発が可能になった。助成期間に9編の査読付き論文発表、3度の国際会議招待講演成果公表、4件の関連特許出願、2017年1月には南日本新聞誌上で研究成果が報道発表されるなど、本研究の学術的意義と社会的意義は高いことを示した。

研究成果の概要(英文)：We evaluated equilibrium phase diagrams in high magnetic fields and obtained the following main results regarding the magnetic field-induced chemical reaction effect (MFE). (1) We have developed a heat treatment quenching furnace in a magnetic fields up to 19T (the world's highest magnetic field). (2) The origin of the MFE for MnBi is mainly due to the enhancement of the MnBi-phase formation rate. (3) It was suggested that magnetic separation of MnBi is possible even at about 0.5 T by using the magnetic field gradient. (4) The origin of the field-induced nonmagnetic-ferromagnetic phase transformation in MnAl is due to the promotion of the nonmagnetic epsilon phase-ferromagnetic tau phase transformation and the suppression of the nonmagnetic beta phase transformation. (5) We found that the epsilon phase was stabilized by C in MnAl. (6) An efficient tau phase magnetic field synthesis method was developed using MnAlZn. (7) Field suppressing effect of crystal size was found with MnCuAl.

研究分野：磁気物理学、強磁場材料科学

キーワード：強磁場 平衡状態図 磁場中合成 強磁性体

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 磁場はシリコン単結晶の合成や磁石の磁場中時効・着磁などで、産業応用されている。基礎材料研究では、名大、物材機構、東北大、山形大や中国・欧州で、磁性材料の機能性向上を目指して、磁場による磁性材料の組織制御や粒界制御が行われて来た。しかし、本研究の「磁気エネルギーの利得で強磁性体を溶融・合成する」の発想に基づいた、詳細かつ系統的研究はなかった。

(2) その最大の理由は、物質材料科学の最も重要で基礎となる「状態図」が強磁場中で得られていないことによる。これは、室温から千数百 K 以上で示されている物質の「状態図」が通常の磁場で大きく変化しないとのイメージによる。しかし、物質が強磁性体で強磁場ならどうなるか。高磁化を持つ磁性体に 1 T の磁場を印加したとき、磁気エネルギーは約 1 K のエネルギーに相当する。高磁化の磁性体に、強磁場を印加すれば、30 K 相当の磁気エネルギーの利得を物質に付加し、磁場で「状態図」を制御できる、と着想した。実際 2015 年度までに、強磁性 MnBi の包晶温度が磁場で上昇(2K/T)する結果を得た。

(3) 強磁場を用いれば、溶融と同様、磁気エネルギーで強磁性体を選択的合成し、新材料創成プロセスを提案できる。強磁場による選択的合成は合成・分離プロセスへの応用も可能である。

### 2. 研究の目的

(1) 研究の目的は、強磁場中状態図を評価し、磁気エネルギーの利得で進む化学反応・合成過程(強磁場化学反応促進効果)を明らかにする。これを基に磁場による選択的結晶成長と分離プロセスに関わる成果を示すことである。

### 3. 研究の方法

(1) 試料は、実用材料と応用に近い MnBi、MnAl、MnAlC、MnAlZn、Mn-Cu-Al に絞って研究を開始した。これらは、高い磁化を高温まで維持し、強磁場による磁気エネルギーの利得が大きく、状態図の大きい変化が期待され、本研究目的達成に最適試料として選定した。

(2) 試料原料の調合、試料合成、結晶特性評価は鹿児島大学で行われた。ゼロ磁場中および 5T 以下の磁場中熱処理は鹿児島大学の電磁石および 5T 無冷媒超伝導マグネットで行われた。10T 以上の強磁場中熱処理は、東北大金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの無冷媒超伝導マグネット(全国共同利用装置)を用いて行った。強磁場超伝導材料研究センターの無冷媒超伝導マグネットに組み込む強磁場中熱処理急冷炉を製作し、実験に用いた。

(3) 得られた試料の基礎物性評価は鹿児島大学で行われた。化学分析は鹿児島大学研究推進機構研究支援センター機器分析施設およびアイソトープ実験施設で行われた。基礎磁気特性は東京大学物性研究所および東北大金属材料研究の全国共同利用装置を用いて行われた。

### 4. 研究成果

(1) 強磁場中状態図の評価および磁場中化学反応・合成過程を評価するために、図 1 のような強磁場中熱処理急冷炉を開発した。その性能は、19T、温度 663 K から最大 38 K/s で急冷でき、世界最高磁場中での急冷炉を完成させ、以後これらの装置を使って研究を進めた。

(2) Mn-Bi 系：Mn-Bi 合金の磁場中固相-固相反応を調査した結果、Mn 粒(grain)の周りに生成される強磁性 MnBi が、ゼロ磁場より約 3 倍多いことを明らかにした。この結果により、従来不明であった Mn-Bi 系の強磁場化学反応促進効果を説明するモデルを図 2 のように提案した。Mn-Bi 系の強磁場化学反応促進効果は、反応の初期段階で強磁性 MnBi 相の初期生成が磁場によって促進されることが主となっている。

(3) Mn-Bi 系磁気分離：合成される物質が強磁性体のとき、磁場勾配と重力を利用すれば、強磁性体が高磁場側に非磁性物質が重力ポテンシャルの低い側に移動することが期待できる。Mn-Bi 系粉体を用いて MnBi の包晶反応温度直下で磁場中

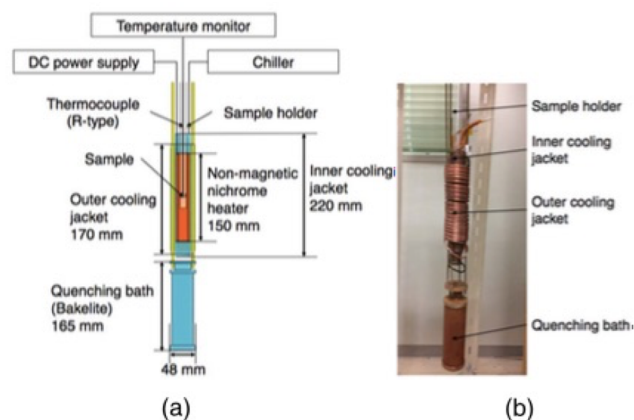


図 1 強磁場中急冷炉。世界最高の 19T 磁場中熱処理急冷が可能である。

熱処理すると、図3のように、磁場中合成された MnBi が高磁場側に移動し、粉体からの化合物分離の可能性を示す結果を得た。

(4) Mn-Al 系 : Mn-Al 合金について磁場中示差熱分析を行った結果、非磁性  $\epsilon$  相から強磁性  $\tau$  相への相変態温度が、磁場によって低下することを見出し、Mn-Al 系の状態図が強磁場で制御できることを実験的に明らかにした。ただし、強磁性  $\tau$  相はゼロ磁場常圧では安定相ではなく、 $\tau$  相から非磁性  $\beta$  相へ相変態が起こる。本研究の詳しい実験的調査により、MnAl 合金の磁場印加による強磁性  $\tau$  相の誘起現象は、磁場による非磁性  $\epsilon$  相から強磁性  $\tau$  相への相変態の促進と、強磁性  $\tau$  相から非磁性  $\beta$  相への相変態の抑制効果によるものと結論付けた。

さらに、Mn-Al 合金について、MnAl 強磁性  $\tau$  相の強磁場中磁気特性を分子場近似により解析し、その結果をもとに  $\tau$  相の磁気エネルギーを評価した。この磁気エネルギーの利得を市販のカルファド法による平衡状態図計算手法ソフトウェアに組み込み、磁場中状態図計算を行った。現在のモデル計算では、図4に示すように、磁場 660T で MnAl 強磁性  $\tau$  相 ( $L_{10}$  相) が安定相として状態図上に現れることが見出された。この結果は定性的に実験結果と矛盾ないが、MnAl 強磁性  $\tau$  相 ( $L_{10}$  相) を安定相とするには、かなりの強磁場を必要になることがわかった。

(5) Mn-Al-C 系 : Mn-Al-C 合金について、C の添加量と平衡状態図等への影響を調査した (図5)。その結果、C の添加によって、平衡状態図上の非磁性  $\epsilon$  相領域の拡大と安定をもたらし、 $Mn_{50}Al_{50}$  に近い組成で強磁性  $\tau$  相が得られ、従来に比べてより高い磁化を持つ MnAl  $\tau$  相合成ができる可能性を示した。

(6) Mn-Al-Zn 系 : 図6に 623 K、3 h 熱処理した  $Mn_{53}Zn_2Al_{45}$  試料の室温での磁化曲線を示す。0 T、10 T、15 T での 1.5 T における磁化は、それぞれ、56、48、72  $Am^2/kg$  となり、Mn-Al に比べ、Zn 置換試料では 3 h の熱処理においても  $\epsilon$ - $\tau$  相変態が十分に進行することが明らかになった。15 T 熱処理では、磁場による  $\tau$  相生成が促進しているが 10 T 熱処理試料では、磁化が低減することがわかった。この傾向は、573 K 熱処理においても観察された。これらの振る舞いは、 $\epsilon$ - $\tau$  相変態に対する磁場効果と  $\tau$  相から平衡相への分解に対する磁場効果が競合したと考えられる。磁化の減少は、磁気エネルギー利得により、10 T においても  $\epsilon$ - $\tau$  相変態は促進するが、 $\tau$  相の相分率が上昇し  $\tau$  相から平衡相への分解が進行することで、10 T で磁化が減少する。一方、15 T では、より大きな磁気エネルギー利得が生じ、 $\tau$  相からの分解が抑制されることで、磁化が上昇したと評価した。つまり、MnAl 系と比べて Mn-Al-Zn 系は、15 T 強磁場中熱処理により  $\epsilon$ - $\tau$  相変態が促進すると同時に  $\tau$ - $\beta$  相変態は抑制される。結果的に、磁場印加により、Zn を Mn と置換した (MnZn)Al は、MnAl に比べ効率的に強磁性  $\tau$  相を得ることができ、磁場中熱処理時間の短縮が可能と評価した。

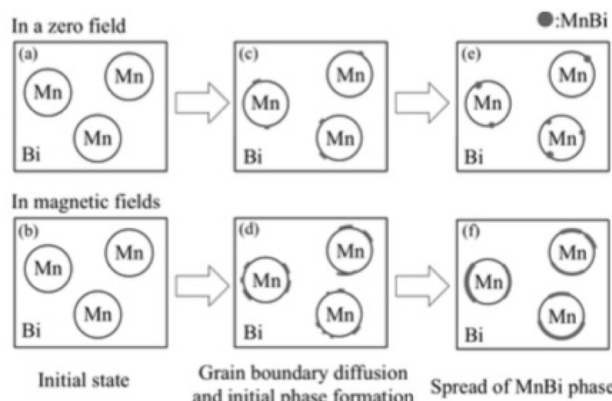


図2 強磁性 MnBi 合成における強磁場反応促進効果の起源モデル。

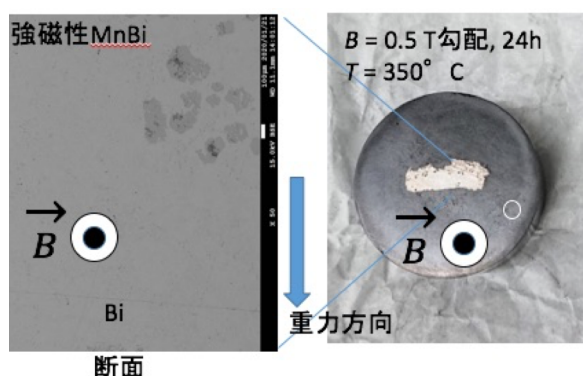


図3 Mn-Bi 粉体の磁場勾配中熱処理した試料の形態写真と電子線マイクロアナライザー分析。

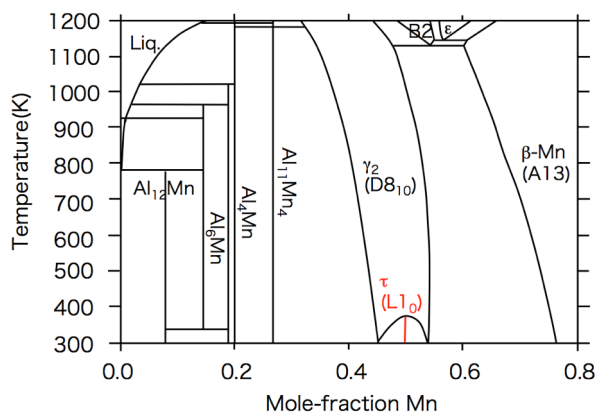


図4 磁場 660T における Mn-Al の強磁場中平衡状態図計算結果。

(7) Mn-Cu-Al 系：非磁性元素から強磁性化合物になる物質として、L2<sub>1</sub> 型 Cu<sub>2</sub>MnAl ホイスラー規則合金が知られている。一方、Cu<sub>2</sub>MnAl 不規則合金は非強磁性で、この物質系を用いて、不規則-規則変態の磁場効果を調べた。現時点で、不規則-規則変態に関する明確な磁場効果は得られていない。しかし、MnCu<sub>2</sub>Al 物質では、1-2 時間以上の磁場中熱処理によって、その結晶サイズが磁場中熱処理時間の増加とともに減少する効果を見出した。この減少率はゼロ磁場熱処理に比べて大きい。磁場 10 テスラ中の熱処理した試料の保持力はゼロ磁場熱処理試料に比べて大きくなるという新しい知見を得た。

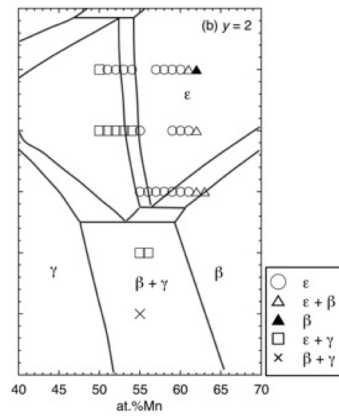


図 5 Mn-Al 平衡状態図と Mn-Al-C<sub>2</sub> 合成の実験結果。

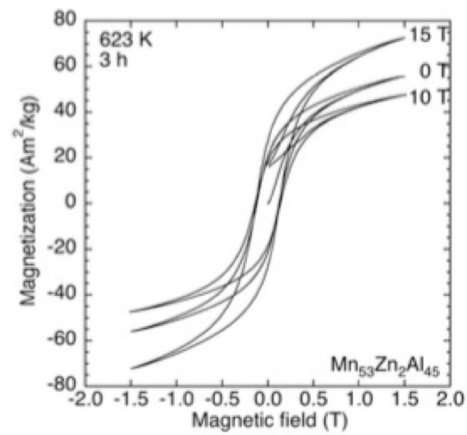


図 6 Mn<sub>53</sub>Zn<sub>2</sub>Al<sub>45</sub> 試料の室温での磁化曲線。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Y. Mitsui, R.Y Umetsu, K. Takahashi, K. Koyama	4. 巻 453
2. 論文標題 Reactive sintering process of ferromagnetic MnBi under high magnetic fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Magn. Magn. Mater.	6. 最初と最後の頁 231-235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.01.026">https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.01.026</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 小林 領太, 三井 好古, 梅津 理恵, 高橋 弘紀, 水口 将輝, 小山 佳一	4. 巻 83
2. 論文標題 磁場印加による強磁性 -Mn-Alへの相変態の促進	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本金属学会誌	6. 最初と最後の頁 181-185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.2320/jinstmet.J2018057">https://doi.org/10.2320/jinstmet.J2018057</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Y. Mitsui, R. Kobayashi, Y. Takanaga, A. Takaki, R.Y Umetsu, K. Takahashi, M. Mizuguchi, K. Koyama	4. 巻 55
2. 論文標題 Different Magnetic Field Effects on the - Phase Transformation Between (Mn, Zn)-Al and Mn-Al-C	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Trans. on Magn.	6. 最初と最後の頁 2100704-(4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2018.2860559">https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2018.2860559</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 R. Kobayashi, Y. Mitsui, K. Takahashi, S. Uda, K. Koyama	4. 巻 55
2. 論文標題 In-field annealing and quenching for ferromagnetic MnBi under 19 T	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Trans. on Magn.	6. 最初と最後の頁 1000204-(4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2018.2872105">https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2018.2872105</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Ryota, Mitsui Yoshifuru, Umetsu Rie Y., Takahashi Kohki, Mizuguchi Masaki, Koyama Keiichi	4. 巻 58
2. 論文標題 Magnetic-Field-Induced Acceleration of Phase Formation in -Mn-Al	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Mater. Trans.	6. 最初と最後の頁 1511 ~ 1518
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.2320/matertrans.MAW201709">https://doi.org/10.2320/matertrans.MAW201709</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小山 佳一、山下 美咲、小林 領太、三井 好古、高橋 弘紀、宇田 聡	4. 巻 50
2. 論文標題 15T級強磁場中小型急冷炉の開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 鹿児島大学理学部紀要	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://hdl.handle.net/10232/00030075">http://hdl.handle.net/10232/00030075</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 小山 佳一、平 敦志、三井 好古、高橋 弘紀	4. 巻 50
2. 論文標題 強磁場中固相焼結で合成したMnBiの特性評価	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 鹿児島大学理学部紀要	6. 最初と最後の頁 6-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://hdl.handle.net/10232/00030076">http://hdl.handle.net/10232/00030076</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R. Kobayashi, Y. Mitsui, R.Y. Umetsu, K. Takahashi, M. Mizuguchi, K. Koyama	4. 巻 8
2. 論文標題 Annealing temperature and magnetic field effects for - transformation in Mn-Al alloys	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Magn. Lett.	6. 最初と最後の頁 1400704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://dx.doi.org/10.1109/LMAG.2016.2617859">https://dx.doi.org/10.1109/LMAG.2016.2617859</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Yamashita, K. Abematsu, K. Takahashi, Y. Mitsui, K. Koyama	4. 巻 8
2. 論文標題 Development of a compact quenching furnace used under high magnetic fields	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Magn. Lett.	6. 最初と最後の頁 6501504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://dx.doi.org/10.1109/LMAG.2016.2621733">https://dx.doi.org/10.1109/LMAG.2016.2621733</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 D. Miyazaki, Y. Mitsui, R. Y. Umetsu, K. Takahashi, S. Uda, K. Koyama	4. 巻 58
2. 論文標題 Enhancement of the Phase Formation Rate during In-Field Solid-Phase Reactive Sintering of Mn-B	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Mater. Trans	6. 最初と最後の頁 730-723
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://dx.doi.org/10.2320/matertrans.MBW201609">https://dx.doi.org/10.2320/matertrans.MBW201609</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計37件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 中川 駿、小林領太、三井好古、小山佳一、梅津理恵、高橋弘紀
2. 発表標題 Cu-Mn-Al 合金の磁場中熱処理
3. 学会等名 日本金属学会九州支部令和元年度合同学術講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林領太、三井好古、及川勝成、小野寺礼尚、梅津理恵、高橋弘紀、小山佳一
2. 発表標題 強磁性 Mn-Al の相平衡に対する磁場効果
3. 学会等名 日本金属学会九州支部令和元年度合同学術講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小山 佳一、高永 悠大、小林 領太、三井 好古
2. 発表標題 Mn-Al 合金の $\beta$ -相に対する C 添加効果
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 領太、三井 好古、梅津 理恵、高橋 弘紀、水口 将輝、小山 佳一
2. 発表標題 (Mn,Zn)-Al に対する磁場中熱処理効果
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三井 好古、麓 秀斗、小林 領太、高橋 弘紀、小山 佳一
2. 発表標題 強磁場中示差熱分析による Mn - Al 基合金の $\beta$ - 変態の速度論的
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Noguchi, Yoshifuru Mitsui, Masahiko Hiroi, Rie Umetsu, Jun Gouchi, Yoshiya Uwatoko and Keiichi Koyama
2. 発表標題 The effects of substituted elements on the spin reorientation in Mn <sub>2-x</sub> FexSb <sub>1-y</sub> Sny
3. 学会等名 Joint 5th Int'l Symposium on Frontiers in Materials Science and 3rd Int'l Symposium on Nano-materials, Technology and Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Yumi Watanabe, Ryota Kobayashi, Yoshifuru Mitsui, and Keiichi Koyama
2. 発表標題 Magnetic effect on phase growth of Mn/Ga diffusion couple
3. 学会等名 Joint 5th Int ' I Symposium on Frontiers in Materials Science and 3rd Int ' I Symposium on Nano-materials, Technology and Applications ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shun Nakagawa, Y. Mitsui, Ryota Kobayashi, Rie Y. Umetsu, Kohki Takahashi, and Keiichi Koyama
2. 発表標題 Magnetic properties of Cu-Mn-Al system annealed under high magnetic fields
3. 学会等名 Joint 5th Int ' I Symposium on Frontiers in Materials Science and 3rd Int ' I Symposium on Nano-materials, Technology and Applications ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Kobayashi, Yoshifuru Mitsui, Katsunari Oikawa, Reisho Onodera, Rie Umetsu, Kohki Takahashi and Keiichi Koyama
2. 発表標題 Magnetic field effect on phase stability of L10-MnAl
3. 学会等名 Joint 5th Int ' I Symposium on Frontiers in Materials Science and 3rd Int ' I Symposium on Nano-materials, Technology and Applications ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiichi Koyama
2. 発表標題 Magnetic field effects on nitridation of Sm <sub>2</sub> Fe <sub>17</sub>
3. 学会等名 Joint 5th Int ' I Symposium on Frontiers in Materials Science and 3rd Int ' I Symposium on Nano-materials, Technology and Applications ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林領太、高木観雄、三井好古、梅津理恵、水口将輝、小山佳一
2. 発表標題 強磁場下におけるMn-Al平衡相の生成抑制
3. 学会等名 平成30年度日本金属学会九州支部合同学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Kobayashi, M. Yamashita, D. Miyazaki, Y. Mitsui, K. Takahashi, S. Uda and K. Koyama
2. 発表標題 Microstructures of MnBi obtained by quenching in magnetic fields up to 19 T
3. 学会等名 International Conference on Magnetism
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Mitsui, R. Kobayashi, A. Takaki, Y. Takanaga, R.Y. Umetsu, M. Mizuguchi, K. Takahashi and K. Koyama
2. 発表標題 n-field Annealing Effects on L10-(Mn,Zn)-Al and Mn-Al-C
3. 学会等名 International Conference on Magnetism
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三井好古、小林領太、高木観雄、梅津理恵、高橋弘紀、水口将輝、小山佳一
2. 発表標題 強磁場中熱処理した(Mn,Zn)-Alの磁気特性
3. 学会等名 2018年第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryota Kobayashi, Shuto Fumoto, Yoshifuru Mitsui, Rie Umetsu, Kohki Takahashi, Katsunari Oikawa, Keiichi Koyama
2. 発表標題 Magnetic field effect on the phase transformation and phase stability of L10-MnAl
3. 学会等名 The 3rd Asian Applied Physics Conference
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三井好古、高永悠大、小林領太、小山佳一
2. 発表標題 hcp-MnAlの相安定性に対するC添加効果
3. 学会等名 2019年第66回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林領太、三井好古、及川勝成、小野寺礼尚、高橋弘紀、小山佳一
2. 発表標題 相の相安定に対する磁場効果
3. 学会等名 2019年第66回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林領太、三井好古、小山佳一、梅津理恵、高橋弘紀、水口将輝
2. 発表標題 強磁場下における Mn-Al 平衡相の生成抑制
3. 学会等名 平成29年度日本金属学会九州支部合同学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高木観雄、小林領太、三井好古、高橋弘紀、水口将輝、小山佳一
2. 発表標題 反応焼結による Mn-Al-C の合成
3. 学会等名 平成29年度日本金属学会九州支部合同学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. MITSUI, R. KOBAYASHI, M. YAMASHITA, K. TAKAHASHI, K. KOYAMA, S. UDA
2. 発表標題 Quenching furnace used in high magnetic fields up to 19 T
3. 学会等名 International Conference on Magneto-Science, 2017 Reims (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Fumoto, R. Kobayashi, Y. Mitsui, M. Ito, K. Takahashi, K. Koyama
2. 発表標題 Differential Thermal Analysis in Mn-Al Alloys under High Magnetic Fields
3. 学会等名 International Conference on Magneto-Science, 2017 Reims (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Kobayashi, Y. Mitsui, R. Y. Umetsu, K. Takahashi, M. Mizuguchi, K. Koyama
2. 発表標題 Phase Transformation of as-cast Mn-Al in High Magnetic Field
3. 学会等名 International Conference on Magneto-Science, 2017 Reims (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Takaki, R. Kobayashi, Y. Mitsui, R. Y. Umetsu, K. Takahashi, M. Mizuguchi, K. Koyama
2. 発表標題 In-field annealing effects on (Mn,Zn)-Al
3. 学会等名 International Conference on Magneto-Science, 2017 Reims (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Takanaga, Y. Mitsui, M. Hiroi, R. Kobayashi, K. Takahashi, K. Koyama
2. 発表標題 In-field annealing effects on Mn <sub>x</sub> Al <sub>100-x</sub> C <sub>2</sub>
3. 学会等名 International Conference on Magneto-Science, 2017 Reims (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小山佳一
2. 発表標題 磁場による強磁性物質の機能性と平衡状態図の制御に関する研究
3. 学会等名 日本磁気科学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三井好古、宮崎泰樹、小山佳一、梅津理恵、高橋弘紀、宇田聡
2. 発表標題 反応初期におけるMnBiの磁場効果
3. 学会等名 日本磁気科学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林領太、山下美咲、三井好古、高橋弘紀、宇田聡、小山佳一
2. 発表標題 Mn-Biに対する磁場中急冷
3. 学会等名 日本磁気科学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Koyama, R. Kobayashi, Y. Mitsui
2. 発表標題 Magnetic Field-Induced Synthesis of Mn-Based Ferromagnetic Alloys
3. 学会等名 Frontiers in Materials Science, 2017 Greifswald (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Koyama, Y. Mitsui
2. 発表標題 Magnetic Field-Induced Synthesis of Ferromagnetic Phase
3. 学会等名 The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 D. Miyazaki, Y. Mitsui, K. Takahashi, S. Uda, K. Koyama
2. 発表標題 Magnetic Fields Effect on Phase Formation of MnBi Synthesized by Reactive Sintering
3. 学会等名 The 4th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 R. Kobayashi, Y. Mitsui, R. Y. Umetsu, K. Takahashi, M. Mizuguchi, K. Koyama
2. 発表標題 Magnetic Field-Induced L10-Ferromagnetic MnAl
3. 学会等名 The 4th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Yamashita, K. Abematsu, K. Takahashi, Y. Mitsui, K. Koyama
2. 発表標題 Synthesis of Mn-Bi alloy using a quenching furnace under high magnetic fields
3. 学会等名 The 4th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 A. Takaki, Y. Mitsui, D. Miyazaki, R. Y. Umetsu, K. Takahashi, K. Koyama
2. 発表標題 Magnetic Field Effects on the Morphology of Bi-Mn System
3. 学会等名 The 4th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 高木 観雄, 三井好古, 宮崎泰樹, 梅津理恵, 高橋弘紀, 小山佳一
2. 発表標題 MnBi形態の磁場効果
3. 学会等名 日本磁気科学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 高永悠大, 小林領太, 三井好古, 廣井政彦, 高橋弘紀, 小山佳一
2. 発表標題 Mn-Al-Cの相変化
3. 学会等名 日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 R. Kobayashi, Y. Mitsui, R.Y. Umetsu, K. Takahashi, M. Mizuguchi, K. Koyama
2. 発表標題 In-field annealing effects on as-melted Mn-Al
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林領太, 三井好古, 梅津理恵, 高橋弘紀, 水口将輝, 高梨弘毅, 小山佳一
2. 発表標題 磁場中熱処理による $\gamma$ -MnAlの安定化
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 Cu-Mn-Al系磁石の製造方法	発明者 三井好古、小山佳一、中川駿	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-231653	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 MnBi系磁性材料の製造方法	発明者 三井好古、小山佳一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-096877	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 Mn-Al-C系磁石の製造方法及びMn-Al-C系磁性焼結体	発明者 三井好古、小山佳一、小林領太	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-034070	出願年 2018年	国内・外国の別 国内



産業財産権の名称 Mn - Al 永久磁石の製造方法及びMn - Al 永久磁石	発明者 三井好古、小林領太、小山佳一、梅津理恵、水口将輝	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2016-041157	出願年 2016年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>鹿児島大学大学院理工学研究科物理宇宙専攻 磁気物理学(小山・三井研究室)ホームページ  <a href="https://www.sci.kagoshima-u.ac.jp/koyama">https://www.sci.kagoshima-u.ac.jp/koyama</a></p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三井 好古  (MITSUI Yoshifuru)  (90649782)	鹿児島大学・理工学域理学系・准教授    (17701)	
研究分担者	伊藤 昌和  (ITO Masakazu)  (40294524)	鹿児島大学・総合科学域総合教育学系・准教授    (17701)	
連携研究者	及川 勝成  (OIKAWA Katsunari)  (70356608)	東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授    (11301)	
連携研究者	梅津 理恵  (UMETSU Rie)  (60422086)	東北大学・金属材料研究所・教授    (11301)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	高橋 弘紀  (TAKAHASHI Kohki)  (60321981)	東北大学・金属材料研究所・助教     (11301)	