

令和元年6月12日現在

機関番号：17701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14374

研究課題名(和文)低融点金属物質を含む強磁性安定相の強磁場発現

研究課題名(英文)Magnetic field induced ferromagnetic stable phase including low melting point metal

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：Fe-Ga系、Mn-Ga系の合成過程に対する磁場効果を解明するために、Fe/Ga及びMn/Ga拡散対試料を作成、ゼロ磁場及び磁場中における固体Feと液体Ga、固体Mnと液体Gaとの相形成の観測を行った。その結果、Fe-Ga系では、(1)Fe₃Ga、Fe₃Ga+Fe₆Ga₅、Fe₆Ga₅、Fe₃Ga₄の相形成が確認された。(2)Fe-Gaの反応は拡散律速に従う。(3)10T磁場中では、相の生成が約40%抑制されていることが見出された。Mn-Ga系では、(1)MnGa、Mn₂Ga₅、MnGa₃が合成され、拡散律速を確認した。(2)相成長係数を決定し、その磁場の影響は小さいことを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの物質合成は、主に元素組成と温度の制御によって行われてきたが、本研究はさらに磁場による磁気エネルギーをつかって新しい物質合成方法について研究してきた。これまでに本研究と関連研究で5件の新しい物質合成に関わる磁場効果現象を見出してきた。本研究によって、磁場で特定のFeGa合金磁石材料の成長を抑制できることを見出した。これは、学術的新発見の大きな成果だけではない。主金属材料合成過程において、不要な合成物を磁場で成長させない技術開発に発展されることが期待される。本研究の成功によって、我が国の科学技術・産業応用など社会的意義の大きい結果を得た。

研究成果の概要(英文)：In-field heat treatments of Fe-Ga and Mn-Ga diffusion couple were performed to investigate the magnetic effect of Fe-Ga and Mn-Ga reactions. For Fe-Ga system, we obtained following results: (1) reactants were Fe₃Ga, Fe₃Ga+Fe₆Ga₅, Fe₆Ga₅, Fe₃Ga₄; (2) Fe-Ga reaction is diffusion controlled; (3) the reactant phase growth was suppressed by approximately 40% in magnetic field of 10 T. For Mn-Ga system, we found following results: (1) reactants were MnGa, Mn₂Ga₅, MnGa₃, and the reaction is diffusion controlled. (2) The growth constant was determined and was not significantly affected by magnetic effects.

研究分野：磁気物理学、強磁場材料科学

キーワード：強磁場物質科学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 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。

一方、我々は基盤研究 B(22360285)の助成のもと、「磁性材料の平衡状態の磁場変化」を調査してきた。その成果の一つに、非磁性 Bi と Mn 粉体をゼロ磁場では合成しない温度 (Bi の融点 545K 以下) で強磁場を印加すると、結晶配向した強磁性 MnBi が合成できることを発見した。つまり、非磁性粉体同士が強磁場で磁気エネルギーの利得が大きくなるように、強磁性 MnBi の固相-固相反応が促進されること (強磁場合成促進効果) を見出した。

本萌芽研究の着想は、「強磁場合成促進効果を利用すれば、従来、低融点原料を含み、物質合成が難しかった強磁性体を合成できるのではいか?」、「強磁場下液体 Ga 中 (融点 303K) で強磁性化合物が創出される過程は?」である。つまり、Fe-Ga 合金、Mn-Ga 合金の合成過程における磁場効果を解明することである。

2. 研究の目的

(1) Fe-Ga 系、Mn-Ga 系の合成過程における磁場効果を解明するために、Fe/Ga 及び Mn/Ga 拡散対試料を用いて、ゼロ磁場と磁場中における固体 Fe と液体 Ga、固体 Mn と液体 Ga との反応について評価することである。

3. 研究の方法

(1) Fe/Ga 拡散対試料は、表面を研磨した Fe (99.99%) の上に Ga (99.99%) をのせ、アルゴンガス雰囲気中石英管に封入して準備された。Mn/Ga 拡散対試料は、表面を研磨した Mn (99.9%) の上に Ga (99.99%) をのせ、アルゴンガス雰囲気中石英管に封入して準備された (図 1)。

拡散対試料はゼロ磁場と最大 15 T 磁場中で熱処理された。Fe/Ga 拡散対試料の熱処理は α -Fe の強磁性領域から常磁性領域になる 973 K、1023 K、1073 K で、12h、24h、48h、72h の条件で行われた。Mn/Ga 拡散対試料の熱処理は、773 K で、12h、24h、48h で行われた。図 2 のように、磁場中熱処理は、図 1 の拡散対試料を冷凍機冷却型超伝導マグネットの室温空間ポア (直径 50mm) 中の電気炉の中で行われた。このとき、試料が磁場中心位置に置かれている。磁場中熱処理は、5T までは鹿児島大学で、5T 以上は東北大学金属材料研究所附属強磁場センターで共同利用によって行われた。熱処理された拡散対試料は反応面と垂直に切断され、EPMA 等によって切断面が評価された。

4. 研究成果

(1) (1) Fe/Ga 拡散対について、図 3 にゼロ磁場中 24h での EPMA 反射電子像(200 倍)と面分析の結果を示す。ゼロ磁場と 10 T 中において、Fe 中に Ga が拡散し相形成する過程が観察された。EPMA 点分析解析結果より、図中の A、B、C、D、F 相はそれぞれ Fe_3Ga 、 $\text{Fe}_3\text{Ga}+\text{Fe}_6\text{Ga}_5$ 、 Fe_6Ga_5 、 Fe_3Ga_4 、 FeGa_3 であることを確認した。12 h と 48 h でも、これらの相形成を確認した。EPMA の解析結果より、生成した 4 つの相は状態図中の合金と一致している。

図 4 に、1073 K における Fe_6Ga_5 、 Fe_3Ga_4 相の厚さと熱処理時間 t の $1/2$ 乗の関係を示す。この図から、反応は拡散律速に従うこと、また 10 T 磁場中では相の生成が約 40% 抑制されていることがわかった。活性化エネルギーおよび頻度因子を評価した結果、磁場は拡散の頻度因子に

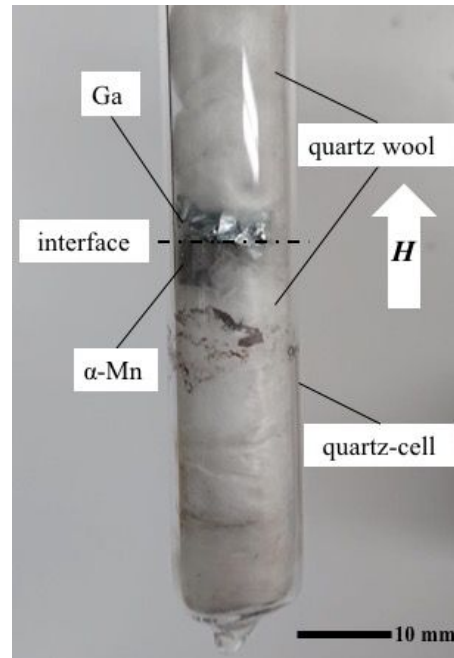


図 1 Mn/Ga 拡散対試料。Fe/Ga 拡散対試料も同様に準備された。

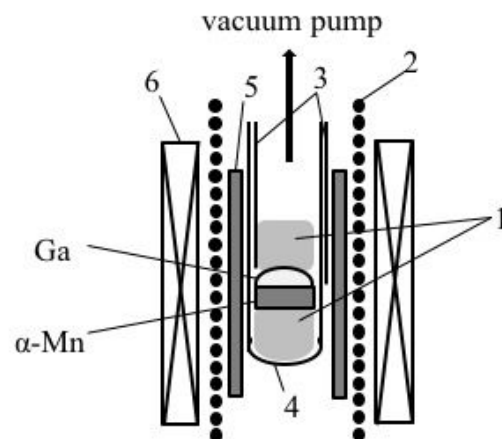


図 2 磁場中熱処理の概略図。1: 石英ウール、2: 水冷ジャケット、3: 熱電対、4 石英ホルダー、5: 電気炉、6: 超伝導マグネット。

影響を与えることが明らかになった。これは、液相 Ga の粘性が磁場によって増大することに起因すると考察された。

(2) Mn/Ga 拡散対について、図 5 にゼロ磁場中と 5 T 磁場中、773K、12h と 24h での EPMA 面分析の結果を示す。ゼロ磁場と 5 T 中において、Mn 中に Ga が拡散し相形成する過程が観察された。EPMA 点分析解析結果より、図中の(i)、(ii)、(iii)、(iv)相はそれぞれ Mn、MnGa、Mn₂Ga₅、FeGa₃であることを確認した。12 h と 48h でも、これらの相形成を確認した。EPMA の解析結果より、生成した 4 つの相は状態図中の合金と一致している。

図 6 に、773K、MnGa と Mn₂Ga₅ 相の厚さと熱処理時間 t の 1/2 乗の関係を示す。この図から、反応は拡散律速に従うこと、また 5 T 磁場中とゼロ磁場とで相の生成速度に大きな違いがないことがわかった。これは、液相 Ga の粘性が磁場によって増大することと頻度因子の磁場による影響の競合に起因すると考えている。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

小山佳一、萩尾聡明、三井好古、高橋弘紀、Fe-Ga 合金の拡散・相形成における磁場効果、日本鉄鋼協会、2019 年 3 月 22 日、東京

渡邊有美、萩尾聡明、小林領太、三井好古、小山佳一、Mn-Ga 合金の反応に対する磁場効果、日本金属学会、2019 年 3 月 20 日、日本金属学会、東京

T. Hagio, Y. Mitsui, K. Takahashi, K. Koyama, Influence of magnetic field on diffusion and phase formation in Fe-Ga alloys, The 3rd Asian Applied Physics Conference, 2018 年 12 月 8 日、福岡市

T. Hagio, Y. Mitsui, K. Takahashi, K. Koyama, Diffusion and phase formation of Fe-Ga alloys under magnetic field, International Conference on Magneto-Science 2017, 2017 年 11 月 26 日, International Conference on Magneto-Science 2017 Reim、レンス市・フランス

萩尾聡明、三井好古、小山佳一、高橋弘紀、Fe 中 Ga 侵入過程の微視的評価、合同学術講演会(日本金属学会九州支部会)、2017 年 6 月 10 日、熊本市

萩尾聡明、宮崎泰樹、三井好古、小山佳一、Fe-Ga 系の反応とその組織、日本物理学会九州支部会、2016 年 12 月 8 日、福岡市

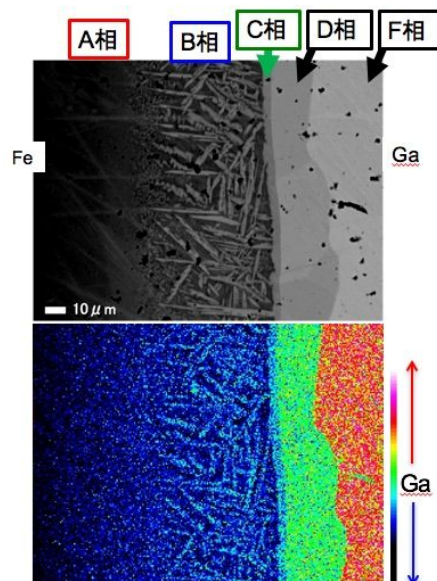


図 3 Fe/Ga 拡散対試料の EPMA 反射電子像と面分析(Ga 濃度)

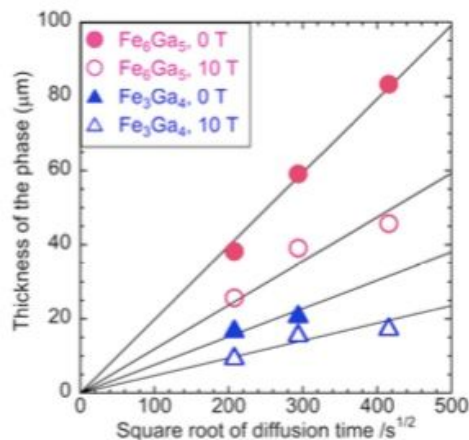


図 4 Fe/Ga 拡散対試料の 1027K における Fe₆Ga₅ 相と Fe₃Ga₄ 相の厚さと熱処理時間の関係

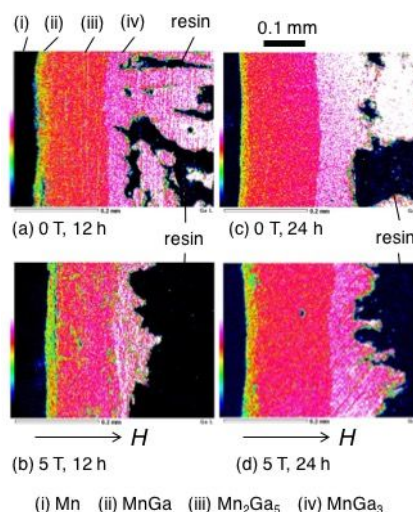


図 5 Mn/Ga 拡散対試料の EPMA 面分析(Ga 濃度)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：三井 好古

ローマ字氏名：(MITSUI Yoshi furu)

所属研究機関名：鹿児島大学

部局名：理工学域理学系

職名：准教授

研究者番号(8桁)：90649782

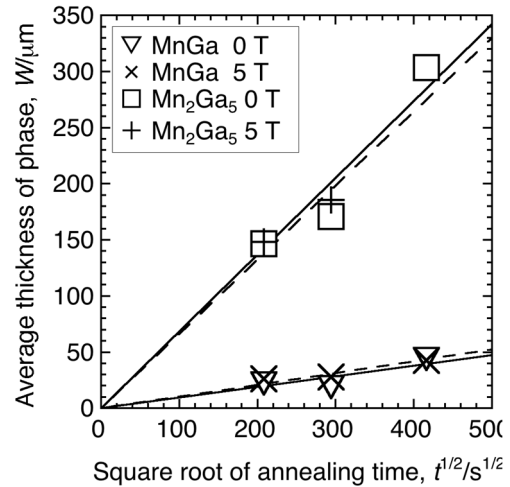


図 6 Fe/Ga 拡散対試料の 773 K における FeGa 相と Fe_2Ga_5 相の厚さと熱処理時間の関係

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。