

研究代表者	嶋 敏之（東北学院大学 工学部 教授）
研究開発担当者	土井 正晶（東北学院大学 大学院工学研究科 教授） 岡田 宏成（東北学院大学 大学院工学研究科 准教授） 白井 正文（東北大学 電気通信研究所 教授） 辻川 雅人（東北大学 電気通信研究所 助教）
課題名	・ラティスエンジニアリングによる高磁化磁性材料の創製および高性能永久磁石材料の開発 ・軽元素添加による高磁化磁性材料の創製ならびに革新的永久磁石材料の開発
研究概要	高性能永久磁石の需要は増加し続けており、従来型Fe系希土類系磁石の性能を超えるブレークスルー技術が要求されている。本研究開発では、高機能性が期待される軽元素添加による新しいマンガン（Mn）基高飽和磁化・高磁気異方性磁性材料の創製の可能性を、エピタキシャルモデル薄膜および第一原理計算から得られた知見を基にバルク材料へ展開することによって革新的次世代高性能永久磁石の開発を目指す。

研究目標・成果

1. 強磁性を示す正方晶逆ホイスラー合金の理論設計

高磁化・高磁気異方性を示す正方晶逆ホイスラー型Fe₂MnGa合金の理論設計

・Fe₂MnGa合金を体積拡張させる方策として、Fe, Mnと比較して原子半径の大きなGa組成の増加が考えられる。そこでGa組成増大による体積への影響を調べた結果、Fe_{1.5}Mn_{1.0}Ga_{1.5}, Fe_{2.0}Mn_{0.5}Ga_{1.5}組成の立方晶L₂₁構造において、それぞれ5.4%, 3.6%まで体積が膨張することを確認した。下図に立方晶L₂₁構造と正方晶XA構造の形成エネルギー差の組成依存性を示す。青丸の組成領域では、正方晶XA構造が最安定構造であることを見出した。また、正方晶XA型Fe-Mn-Ga合金の磁化および磁気異方性エネルギーについて組成依存性を調べた結果、FeをGaと置換した場合に、磁化はGa組成の増大に伴い単調に減少するが、磁気異方性エネルギーは組成に依らず大きな値が保たれることを明らかにした。また、Fe_{1-x}MnGa_{1+x} (x ≤ 0.5)合金においては、異方性磁界は磁化に対して線形に減少することを明らかにした。このように、正方晶構造が安定であるFe_{1-x}MnGa_{1+x} (0.1 ≤ x ≤ 0.5)合金において、いずれの組成においても、B_s = 1.28T, K_u = 2.0 MJ/m³, H_k = 2800kA/mを超える特性が得られることが期待される。参考論文) M. Tsujikawa et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 055506 (2020).

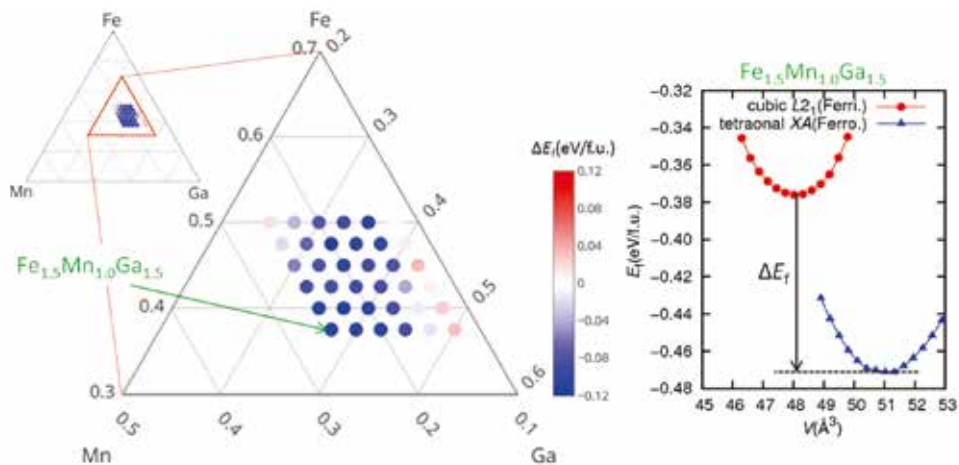


図. Fe-Mn-Ga合金における立方晶L₂₁構造と正方晶XA構造の形成エネルギー(E_f)の比較(左図)とFe_{1.5}Mn_{1.0}Ga_{1.5}合金における形成エネルギーの体積依存性(右図).

2. 軽元素添加による正方晶逆ホイスラー型高飽和磁化・高磁気異方性磁性薄膜・合金材料の開発

高飽和磁化を示すMn_{3-x}Fe_xGa合金薄膜の作製

軽元素(N)添加bcc系Fe-Mn-Ga-N薄膜における高飽和磁化

・ 正方晶逆ホイスラー化を念頭にMn原子をFe原子で置換し、格子歪による磁気特性の変化を調べる目的でMgO単結晶基板上に超高真空電子ビーム蒸着装置を用いてMn_{3-x}Fe_xGa合金薄膜を作製した。Mn_{1.0}Fe_{2.0}Ga薄膜の試料において膜厚を薄くし、 $t_{\text{Mn-Fe-Ga}} \leq 3 \text{ nm}$ において面内磁化容易軸から垂直磁化容易軸へと変化し、磁気異方性が大きくなることを確認した（高飽和磁化（0.94 T）、高磁気異方性（1.43 MJ/m³）。さらに、Fe, GaリッチMn_xFe_yGa_{1.5}合金薄膜（1 nm）において高飽和磁化（1.38 T）、高磁気異方性（2.01 MJ/m³）を示唆する実験結果が得られたことから、目標値である高飽和磁束密度（ $B_s > 1.6 \text{ T}$ ）・高磁気異方性（ $K_u > 2 \text{ MJ/m}^3$ ）達成の足がかりが得られた。

・ Fe-Mn層とFe-Ga-N層を多層化し、総膜厚が20nmになるように調整した試料を作製した。その結果、Fe-Mn層のMn量を80%から徐々に減少させることにより飽和磁化は徐々に増加し（下右図）、Mn量が40%においてFe-Mn/Fe-Ga-N系で最大の飽和磁化である1159 emu/cm³=1.45 Tが得られた。高い飽和磁化が発現した機構を詳細な構造解析により調べる必要がある。

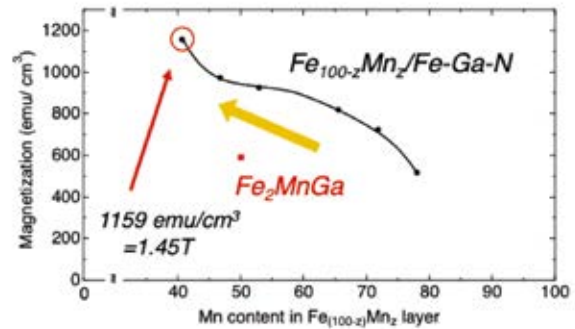
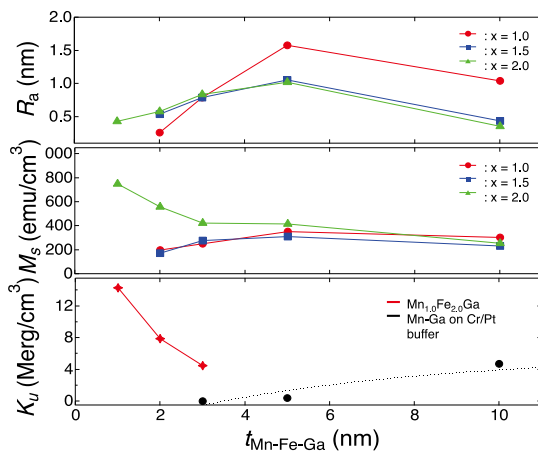


図. 膜厚に対する表面粗さ R_a 、飽和磁化 M_s および異方性 K_u (左図)および[FeMn/FeGaN]薄膜のMn量による磁化曲線および飽和磁化の変化(右図)。

想定する分野・用途

- 脱化石燃料・低炭素時代における省エネルギー、クリーンエネルギーに関わる技術開発
- レアメタルを含まない高性能永久磁石材料を開発するための革新的な技術

最終目標

- 理論計算により安定構造を示すと予測されている正方晶逆ホイスラー構造を有する合金の合成
- 軽元素添加・格子伸長による高い飽和磁化かつ高い結晶磁気異方性を有する磁石材料の発現

産業界への要望

- 組織制御によるバルク合金の高保磁力化・永久磁石化プロセスへの展開
- 研究を継続し優れた磁石材料を実現するための共同研究・委託研究実施による積極的な支援

お問合せ 宮城県多賀城市中央1-13-1 東北学院大学 E-mail : shima@mail.tohoku-gakuin.ac.jp