

令和元年5月30日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04488

研究課題名（和文）界面制御された積層型ナノコンポジットモデル磁石膜の開発

研究課題名（英文）Development of interface controlled nanocomposite model magnet multilayers

研究代表者

小池 邦博 (KOIKE, KUNIHIRO)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：40241723

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本申請課題では高保磁力Nd₂Fe₁₄B相と高飽和磁化Fe合金相，さらに非磁性Nd合金相との界面形成による発現が期待される「交換結合状態の異方性」とナノ構造を精密制御可能な「薄膜プロセス」を利用し，ハード磁性相としてNd₂Fe₁₄B，ソフト磁性相としてFe₈₀B₂₀（シリーズI）と高飽和磁化を有するFe₄₅Co₅₅（シリーズII）の2つの積層型ネオジム系ナノコンポジット磁石膜の形成を試みた．この結果，交換結合と積層構造を同時達成する基礎技術と新たな磁気異方性制御方法が見出されており，本研究で得られた積層磁石膜が単なるモデル試料としてだけでなく，MEMSデバイス材料としての応用が期待される．

研究成果の学術的意義や社会的意義

薄膜プロセスによる界面制御技術を導入し，ハード相であるNd₂Fe₁₄Bのc面とa-b面方位に合わせて接合する粒界相物質を変えたナノコンポジットモデル薄膜を形成する点，すなわち，交換結合状態のNd₂Fe₁₄B/Fe界面依存性を利用して高い永久磁石材料特性を得る指針を得ることが，本申請課題の学術的特色である．この成果はレアメタルを使用せずに高い(BH)_{max}をもつネオジム永久磁石材料の開発指針となる．さらに本研究過程において見出された新規な磁気異方性制御方法は学術的・工業的にも興味深い内容を含んでおり，本手法が高性能MEMSデバイス材料開発の足がかりとなる事が期待される．

研究成果の概要（英文）： In this study, we attempted to form two-types of multilayered Nd₂Fe₁₄B nanocomposite magnet films by combining the magnetic soft phase Fe₈₀B₂₀ (series I) and Fe₄₅Co₅₅ (series II) with the hard magnetic phase Nd₂Fe₁₄B using a thin film fabrication process that allows precise control the nanostructure and an anisotropic exchange coupling state that is generated by interface-control of soft magnetic Fe-based alloy with high moment and non-magnetic Nd-based alloy to the hard magnetic Nd₂Fe₁₄B phase with high coercivity.

As a result, we have found a fundamental technology and a new approach of magnetic anisotropy control to achieve the exchange coupling between hard/soft magnetic phases and the formation of multi-layered structure of the films simultaneously. The findings obtained in this study are expected not only to form of models of magnet but also as MEMS device materials.

研究分野：磁性材料，薄膜工学

キーワード：ナノコンポジット 界面制御 異方性制御 省レアメタル Nd₂Fe₁₄B 高保磁力

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

永久磁石材料の自動車用モータや発電機応用において課題となっている高耐熱性の付与と資源問題の早期解決が求められている。これらの課題を解決できる有力な候補としナノサイズの硬磁性相(高保磁力)粒子と軟磁性(高飽和磁化)相粒子からなるナノコンポジット磁石が Skomski 等の理論計算^[1]によって予言されている。これまでに $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ をハード磁性相とし、Fe 合金をソフト磁性相とした交換結合型のナノコンポジット磁石の作製が試みられたが、高品位な結晶性のナノ粒子の形成や配向制御が困難なため、20 年を経た現在もネオジム系ナノコンポジット永久磁石では単相ネオジム磁石の $(BH)_{\text{max}}$ の値を超えることができていないのが実情である。近年、磁化低下の要因として、交換結合定数 J_{ex} の符号の $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 界面依存性^[2-5]や両相間の熱原子拡散^[6,7]が理論と実験から指摘されてきた。

2. 研究の目的

本申請課題では高保磁力 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相と高飽和磁化 Fe 合金相、さらに非磁性 Nd 合金相との界面形成による発現が期待される「交換結合状態の異方性」とナノ構造を精密制御可能な「薄膜プロセス」を利用し、レアメタルフリーと高い最大エネルギー積、高保磁力を同時に達成可能とする基盤技術となる「界面制御された積層型ナノコンポジットモデル磁石膜の開発」を目指す。ハード磁性相として $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 、ソフト磁性相として $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ (シリーズ I) と高飽和磁化を有する Fe-Co (シリーズ II) の 2 つの積層型ネオジム系ナノコンポジット磁石膜の形成を試み、その微細構造と磁気特性の関係を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

積層膜は UHV スパッタ装置を用いて 10 mm^2 の $\text{MgO}(001)$ 単結晶基板上に作製した。膜構成はソフト磁性相を $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ とした $\text{MgO}(001)/\text{Mo}(20\text{ nm})/[\text{Nd-Fe-B}(30\text{ nm})/\text{Mo}(t_{\text{Mo}}=0, 1\text{ nm})/\text{Fe-B}(5\text{ nm})/\text{Mo}(t_{\text{Mo}}=0, 1\text{ nm})]5/\text{Mo}(10\text{ nm})\text{Mo}$ (シリーズ I) と、ソフト磁性相を Fe-Co とした $\text{MgO}(001)/\text{Mo}(20\text{ nm})/[\text{Nd-Fe-B}(30\text{ nm})/\text{Mo}(t_{\text{Mo}}=0, 1\text{ nm})/\text{Fe-Co}(5\text{ nm})/\text{Mo}(t_{\text{Mo}}=0, 1\text{ nm})]5/\text{Mo}(10\text{ nm})\text{Mo}$ (シリーズ II) である。以降、前者をシリーズ I、後者をシリーズ II と呼ぶ。また、両シリーズ共に Mo 中間層厚 t_{Mo} が 0 nm の積層膜試料を Mo 中間層無し、 $t_{\text{Mo}}=1\text{ nm}$ の積層膜を Mo 中間層有りとして表記する。Nd-Fe-B 層を結晶化させるために、UHV 環境で真空中アニールを行なった。UHV アニール試料は、 10 mm^2 基板の試料を 4 分割した 5 mm^2 の形状とした。アニール温度範囲は $T_a=400^\circ\text{C}$ から最高で 800°C とし、 50°C 毎に温度上昇させた。マルチステップアニールは、シングルステップの各温度パターンでアニールした後、目標到達温度で 30 分間保持し、室温まで冷却して大気中へ取り出すことで試料のアニールプロセスの熱履歴を一致させた。試料の結晶構造と配向状態は XRD で、膜厚は XRR 法で評価した。試料の膜表面形態は AFM によって観察した。試料の微細構造観察と結晶性評価ならびに組成分析は、それぞれ TEM 及び SAD と EDS を用いて行った。磁化曲線と粒子間磁気相互作用解析のための ΔM プロットの測定には、最大印加磁場が $\pm 15\text{ kOe}$ の VSM ならびに $\pm 50\text{ kOe}$ の SQUID 磁力計を用いた。

4. 研究成果

(1) シリーズ I 積層膜の微細構造

Fig. 1 に as-depo. 状態と $T_a=750^\circ\text{C}$ でアニールしたシリーズ I の $\text{MgO}(001)/\text{Mo}(20\text{ nm})/[\text{Nd-Fe-B}(30\text{ nm})/\text{Mo}(t_{\text{Mo}}=0, 1\text{ nm})/\text{Fe-B}(5\text{ nm})/\text{Mo}(t_{\text{Mo}}=0, 1\text{ nm})]5/\text{Mo}(10\text{ nm})\text{Mo}$ 積層膜の 3D-AFM 像を示す。膜表面形態には、Mo 中間層やアニールの有無による変化は見られず、膜表面粗さ R_a は 0.5 nm 程と平坦であった。Fig. 2 に as-depo. 状態 (青色) と $T_a=750^\circ\text{C}$ でアニールした (赤色) シリーズ I 試料の XRD パターンを示す。Mo 中間層無し試料では、as-depo 状態でソフト磁性相である Fe_2B および Fe_3B のピークが確認され、 750°C ではそれらに加え、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ のピークが確認された。一方、(b) の Mo 中間層有りでは、as-depo. 状態で (a) の場合と同様に Fe_2B および Fe_3B のピークが確認され、 750°C では $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ のピークが確認された。

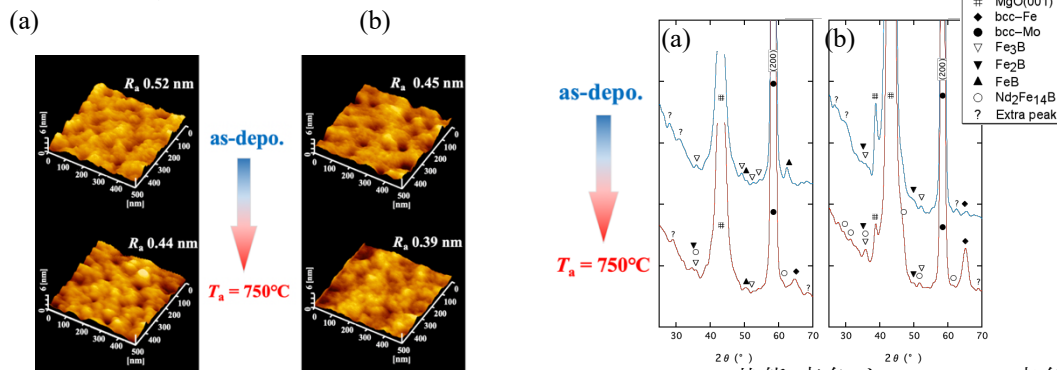


Fig. 1 as-depo. 状態および $T_a=750^\circ\text{C}$ でのアニール後における (a) Mo 中間層無し、(b) Mo 中間層有りのシリーズ I 積層膜の AFM 像。

Fig. 2 as-depo. 状態 (青色) と $T_a=750^\circ\text{C}$ (赤色) でのアニール後における (a) Mo 中間層無し、(b) Mo 中間層有りの Fig. 4 に示したシリーズ I 積層膜の XRD パターン。

(2) シリーズ I 積層膜の磁気特性

Fig. 3 に as-depo.状態と 750°Cでアニールしたシリーズ I 積層膜の磁化曲線を示す. as-depo.状態では Mo 中間層の有無に関わらず, 膜面内, 面直方向共に非常に小さな保磁力($H_c \sim 50$ Oe)であり, 膜面内(IP)の磁化曲線において, 低い磁化率($\chi (= M/H)$)の磁化曲線が見られ, 薄膜特有の形状磁気異方性 (反磁界) に抗して膜面直方向が容易磁化軸となる事が分かる. 一方, 750°Cでのアニール後は, いずれの試料も膜面内, 面直方向共に大きなヒステリシスを示し, 残留磁化と保磁力を持つ. Mo 中間層無し試料では, 膜面内方向が磁化容易軸であり, $H_{c\parallel}$ (面内方向の保磁力)は 1 kOe 程度であるが, Mo 中間層有りの試料の $H_{c\perp}$ (面直方向の保磁力)は 3 kOe 程度で二段の減磁過程となり, 膜面直の $H_{c\perp}$ は 5 kOe 程度で一体の減磁曲線となり, 膜面直方向が磁化容易軸であった. また, 面直方向の初磁化曲線は下に凸となる放物線的形状であり, 高保磁力を示したソフト相を Fe-B とした積層膜における保磁力発生機構はピンニング型である事が示唆される.

(3) シリーズ II 積層膜の微細構造

Fig. 4 に as-depo.状態と $T_a = 800^\circ\text{C}$ でアニールしたシリーズ II の MgO(001)/Mo(20 nm)/[Nd-Fe-B(30 nm)/Mo($t_{\text{Mo}} = 0, 1$ nm)/Fe-Co(5 nm)/ Mo($t_{\text{Mo}} = 0, 1$ nm)]₅/Mo(10 nm)Mo 積層膜の 3D-AFM 像を示す. 膜表面形態には, Mo 中間層やアニールの有無による大きな変化は見られず, 膜表面の粗さ R_a は 0.3 nm 程で平坦であった.

Fig. 5 にシリーズ II 試料の結晶状態を評価した XRD パターンを示す. 青いパターンが as-depo 状態であり, 赤いパターンが 800°Cアニールの結果である. また, シリーズ I とは異なり, この XRD パターンは in-plane 測定の結果である. as-depo 状態ではソフト磁性相である FeCo のピークが確認され, $T_a = 800^\circ\text{C}$ ではハード磁性相である Nd₂Fe₁₄B のピークが確認された.

(4) シリーズ II 積層膜の磁気特性

Fig. 6 に as-depo.状態と $T_a = 800^\circ\text{C}$ でアニールした MgO(001)/Mo(20 nm)/[Nd-Fe-B(30 nm)/Mo($t_{\text{Mo}} = 0, 1$ nm)/Fe-B(5 nm)/ Mo($t_{\text{Mo}} = 0, 1$ nm)]₅/Mo(10 nm)Mo (シリーズ II) 積層膜の磁化曲線を示す. as-depo.状態ではシリーズ I と同様に Mo 中間層の有無に関わらず, 膜面内, 面直方向共にソフト磁性が現れており, 膜面直方向が磁化容易軸となっている他, 800°Cでのアニール後は, いずれの試料も膜面内, 面直方向共に大きなヒステリシスを示し, 残留磁化と保磁力を持つハード磁性が現れている.

(5) 単層膜と積層膜の磁気特性の比較

本研究で作製したハード磁性相である Nd₂Fe₁₄B と異なる種類のソフト磁性相の積層化が磁気特性に与える効果を検討するために, リファレンスとして積層膜と同条件で製膜し, 750°Cでアニールした MgO(001)/Mo(20 nm)/Nd-Fe-B(30 nm)/Mo(10 nm)単層膜^[1]とシリーズ I の Mo 中間層有り 750°Cアニール試料およびシリーズ II の Mo 中間層有り 800°Cアニール試料についての磁化曲線を Fig. 7 に示す.

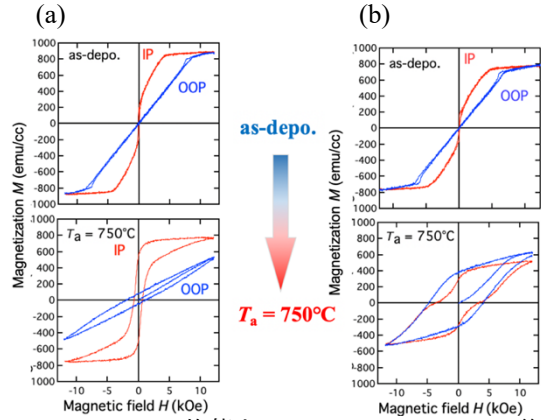


Fig. 3 as-depo 状態と $T_a = 750^\circ\text{C}$ のアニール後の (a)Mo 中間層無しと (b)Mo 中間層有りの Fig.6 のシリーズ I 積層膜の磁化曲線 (赤: 膜面内方向 (IP), 青: 膜面直方向 (OOP)).

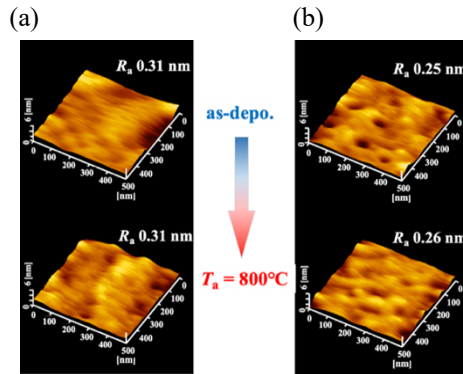


Fig. 4 as-depo.状態および $T_a = 800^\circ\text{C}$ でのアニール後における (a)Mo 中間層無し, (b)Mo 中間層有りのシリーズ I 積層膜の AFM 像.

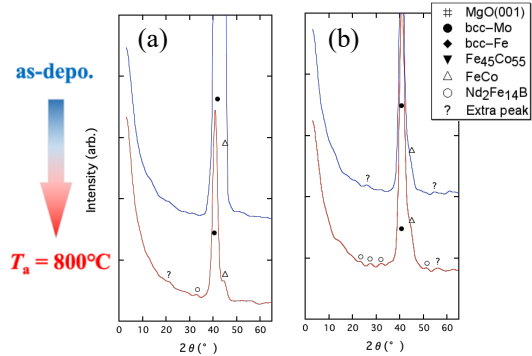


Fig. 5 as-depo.状態と $T_a = 800^\circ\text{C}$ でのアニール後の (a)Mo 中間層無し, (b)Mo 中間層有りのシリーズ II 積層膜の XRD パターン.

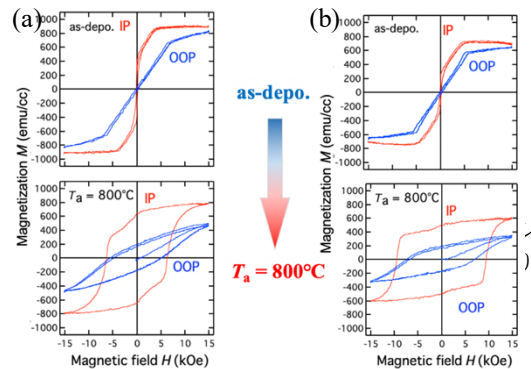


Fig. 6 as-depo 状態と $T_a = 800^\circ\text{C}$ のアニール後の (a)Mo 中間層無しと (b)Mo 中間層有りの Fig.7 のシリーズ II 積層膜の磁化曲線 (赤: 膜面内方向 (IP), 青: 膜面直方向 (OOP)).

Fe-B と積層したシリーズ I の垂直方向の M_r は単層膜の垂直 M_r 値よりも 200 emu/cc 程度、Fe-Co と積層したシリーズ II の面内方向 M_r は単層膜の面内 M_r 値よりも 500 emu/cc 程度大きい事が分かる。これらの Nd-Fe-B リファレンス単層膜との磁気特性の比較から、Nd₂Fe₁₄B 層をそれよりも大きな飽和磁化の Fe 基合金のソフト磁性相と積層化することで M_r 値が増加することが確認された。この結果は、これらの積層膜において角型性が良好な減磁曲線が得られていることと合わせると、ハード磁性相とソフト磁性相間の交換相互作用の存在を示唆する。

(6) 磁氣的相互作用の解析とその起源

上述の磁気特性の検討から、本研究で得られた高保磁力を持つ積層膜のハード磁性相とソフト磁性相間に磁氣的相互作用の存在が示唆された。そこでこの磁氣的相互作用を評価するために、Henkel や Kelly 等によって独立に提案された Henkel プロットあるいは ΔM プロット法^[8]と呼ばれる解析を試みた。まず最も単純なモデルとして一軸磁気異方性を持つ単磁区状態の強磁性相から成る系を考える。相間に磁氣的相互作用が働く場合、以下の関係が成立する。

$$\Delta M = m_a(H) - (1 - 2m_r(H)) \quad (1)$$

ここで $m_a(H)$ と $m_r(H)$ は各々 $M_a(H)$ と $M_r(H)$ を $M_r(\infty)$ で規格化して得られる。 ΔM とは相間相互作用の指標であり、理想的な Stoner-Wohlfarth 理論からの“ずれ”として表され、もし $\Delta M = 0$ ならば相互作用が無く、 $\Delta M > 0$ ならば交換相互作用、 $\Delta M < 0$ ならば双極子-双極子相互作用が相間に働く事を意味する。Fig. 8 にシリーズ I の Mo 中間層有り 750°C アニール試料とシリーズ II の Mo 中間層有り 800°C アニール試料についての $m_a(H)$ 曲線と $m_r(H)$ 曲線、ならびに ΔM 曲線を示す。共に ΔM 曲線には保磁力近傍に正のピークが現れており、ソフト磁性相の種類によらず、交換相互作用が相間に働いている事が明らかとなった。これまでに 1 nm 厚の非磁性 Mo 中間層を導入した Nd₂Fd₁₄B/Mo/ α -Fe における FMR を用いた研究で Nd₂Fd₁₄B と α -Fe は交換結合していない事が明らかとなっており^[5]、さらに Nd₂Fd₁₄B の交換相互作用は、その磁壁幅である 2~5 nm 程度の極めて近距離の原子スピンのみしか作用しないことが知られている。よって、これらの既報の結果からは、ハード相とソフト相の間に 1 nm 厚の非磁性 Mo 中間層がある場合は両相間には交換相互作用は働かないこととなり、それらと同様な構造をもつ本研究の磁氣的相互作用に関する解析結果と矛盾する。

そこで、膜の微細構造の情報を得るためにシリーズ I の Mo 中間層有りの積層膜の as-depo. 状態と $T_a = 750^\circ\text{C}$ でのアニール後について観察と分析を行った断面 HAADF-TEM 像と EDS による元素マッピング像を Fig. 14 に示す。同試料について AFM 観察した Fig. 4 の表面形態と R_a から推察された結果と矛盾せず、as-depo. 状態の断面 TEM 像には連続な層と平坦な界面が現れており、元素マッピング像からも各層がほぼ設計膜厚通りで積層構造が形成されているのが確認できる。これに対して $T_a = 750^\circ\text{C}$ でアニールした後では、各層の膜厚は as-depo. 状態とほとんど変わらず積層構造を維持しているものの、Mo 元素のマッピング像からは、Mo 中間層が部分的に消失していることが分かった。よって、この非磁性 Mo 中間層が消失している領域において、ハード磁性相とソフト磁性相が接して交換相互作用が働く可能性が示唆される。

(7) まとめ

本研究では、異なる組成のソフト相を有する積層型ナノコンポジット磁石膜の形成を試み、その微細構造と磁気特性について検討した結果、以下の知見を得た。

- ① ソフト磁性相を Fe-B とした積層膜 (シリーズ I) において、Mo 中間層無しでは面直 $H_c \sim 1$

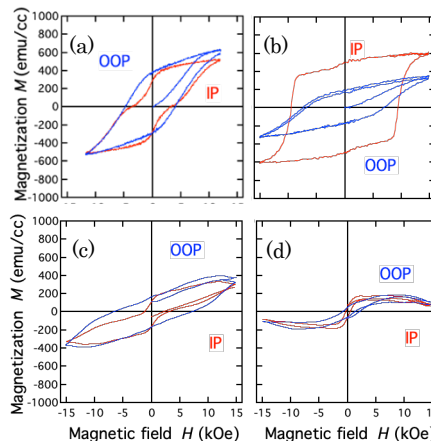


Fig. 7. (a) シリーズ I における Mo 中間層有り 750°C アニール積層膜, (b) シリーズ II における Mo 中間層有り 800°C アニール積層膜, (c) 750°C アニール Nd-Fe-B リファレンス単層膜, (d) 800°C アニール Nd-Fe-B リファレンス単層膜の磁化曲線。

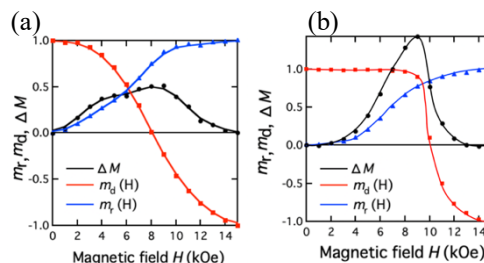


Fig. 8 (a) シリーズ I の Mo 中間層有り $T_a = 750^\circ\text{C}$ アニール試料, (b) シリーズ II の Mo 中間層有り $T_a = 800^\circ\text{C}$ アニール試料の $m_a(H)$ 曲線と $m_r(H)$ 曲線, ΔM 曲線。

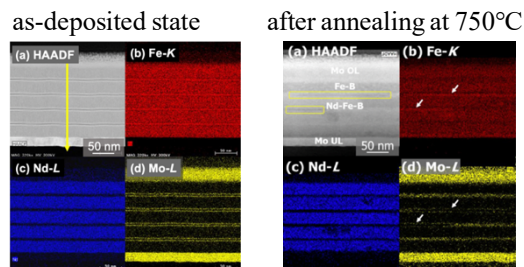


Fig. 9 シリーズ I の Mo 中間層有り積層膜の断面 TEM 像および EDS マッピング像 ((a) HAADF 像, (b) Fe 元素, (c) Nd 元素, (d) Mo 元素, 左側: as-depo. 状態, 右側: 750°C アニール)

kOe 程度のハード磁性を示し、Mo 中間層有りでは面直 $H_c \sim 5$ kOe 程度のハード磁性を示した。磁化容易軸は膜面直方向の垂直磁化膜であった。

② ソフト磁性相を Fe-Co とした積層膜 (シリーズ II) において、Mo 中間層無しでは、面内 $H_c \sim 6$ kOe 程度のハード磁性を示し、Mo 中間層有りでは、面内 $H_c \sim 9$ kOe 程度のハード磁性を示した。Mo 中間層の有無にかかわらず磁化容易軸は面内方向であった。

③ ソフト磁性相 α -Fe、Fe-B、Fe-Co の中で Fe-Co の積層膜が最も高い残留磁化 M_r を示し、600 emu/cc 程度であった。

④ 減磁曲線が一体となった試料において、 ΔM プロット解析を行なった結果、交換相互作用の存在が確認され、Mo 中間層の消失領域でのハード磁性相とソフト磁性相が接することで作用していることが示唆された。

<引用文献>

- ① R. Skomski and J. M. D. Coey, Phys. Rev. B, **48**, (1993) 15812.
- ② Y. Toga, H. Moriya, H. Tsuchiura, and A. Sakuma, J. Phys.: Conf. Ser., **266**, (2011) 012046.
- ③ N. Umetsu, A. Sakuma, and Y. Toga, Phys. Rev. B, **93**, (2016) 014408(1-6).
- ④ D. Ogawa, K. Koike, S. Mizukami, M. Oogane, Y. Miyazaki and Kato, J. Magn. Soc. Jap., **36**, (2012) 5.
- ⑤ D. Ogawa, K. Koike, S. Mizukami, T. Miyazaki, M. Oogane, Y. Ando, and H. Kato, Appl. Phys. Lett., **107**, (2015) 102406.
- ⑥ W.B. Cui, Y.K. Takahashi, and K. Hono, Adv. Mater. **24** (2012) 6530.
- ⑦ K. Kobayashi, D. Ogawa, K. Koike, H. Kato, T. Miyazaki, Y. Ando and M. Itakura, J. Phys: Conf. Ser., **903**, (2017)012015.
- ⑧ P.E. Kelly, K. O'Grady, P.I. Mayo and R.W. Chantrell, IEEE Trans. Magn., 25, 3881-83 (1989).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① M. Sato, Y. Yoshida, T. Suzuki, Y. Takahashi, K. Koike, and N. Inaba, Magnetostriction measurement system of magnetic thin films with Michelson interference, J. Mag. Soc. Jpn., 査読有り、Vol、3、2019, pp.39– pp.42.
- ② N. Okada, T. Sasabuchi, K. Koike, T. Mineta, MEMS Magnetic Sensor with Bridge-Type Resonator and Magnetostrictive Thin Film, Elec. and Comm. Jpn. 査読有り、Vol、101、No、3、2018、pp.90– pp.95.
- ③ M. Itakura, J. Fukuda, K. Koike, H. Ishikawa, D. Ogawa, and H. Kato, Microstructure and coercivity in La-coated $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ thin films, AIP Advances、査読有り、Vol、7、2018、pp.035301–pp.1035301-9.
- ④ K. Koike, D. Ogawa, H. Kato, Interface and Exchange Coupling for $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha$ -Fe Nano-Composite Thin Film Magnets, Magnune/Magnetics Jpn., 査読有り、Vol、13、No、1、2018、pp.19– pp. 27.
- ⑤ K. Koike, D. Ogawa, H. Kato, Interface modification and Magnetic properties of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ Prepared by Thin Film Processes, Magnune/Magnetics Jpn., 査読有り、Vol、11、No、6、2016、pp.333– pp. 343.
- ⑥ K. Kobayashi, D. Ogawa, K. Koike, H. Kato, T. Miyazaki, Y. Ando and M. Itakura, Fabrication of orientation-controlled nanocomposite $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\text{Mo}/\alpha$ -Fe multilayer films, J. Phys: Conf. Ser., 査読有り、Vol.903, (2017) pp.012015-1–pp.012015-3.

[学会発表] (計 9 件)

- ① 小池邦博, 大橋一輝, 鈴木拓哉, 稲葉信幸, 齋藤 佑, 大久保晋, 太田 仁, 板倉 賢, 加藤宏朗, テラヘルツ ESR による $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\text{Mo}/\text{Fe}$ 系ナノコンポジット膜の交換結合状態の研究, 平成 30 年度神戸大学分子フォトサイエンス研究センター共同研究成果報告会, 2019 年 3 月 8 日 (神戸大学, 分子フォトサイエンス研究センター) 【招待講演】.
- ② 小池邦博, 大橋一輝, 鈴木拓哉, 稲葉信幸, 齋藤 佑, 大久保晋, 太田 仁, 板倉 賢, 加藤宏朗, α -Fe/ $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系における界面とナノコンポジット磁石, H30 年度スピニクス特別研究会, 2018 年 11 月 15 日~11 月 16 日 (東北大学, 電気通信研究所) 【招待講演】.
- ③ K. Ohashi, K. Koike, T. Suzuki, N. Inaba, H. Kato, M. Kondo, M. Itakura, M. Nishida, Effect of Fe-B layer on Microstructure and Magnetic Properties of Exchange Coupled Nd-Fe-B/Mo/Fe-B Nanocomposite Multilayer Films, The 21st International Conference on Magnetism (ICM2018), JULY 16-20, 2018 (MOSCONE CENTER, San Francisco USA).
- ④ 大橋一輝, 鈴木拓哉, 小池邦博, 稲葉信幸, 加藤宏朗, 近藤政孝, 板倉 賢, 西田 稔, Nd-Fe-B/Fe-B 系ナノコンポジット膜の微細構造と交換結合状態に与える Mo 中間層の効果, P63, 日本金属学会 2018 年春期講演大会(第 162 回), 2018 年 3 月 19 日~3 月 21 日 (千葉工業大学, 新習志野キャンパス).
- ⑤ 大橋一輝, 神尾知志, 小池邦博, 稲葉信幸, 加藤宏朗, 小川大介, 近藤政孝, 板倉 賢, 大兼

幹彦, 安藤康夫, ナノコンポジット Nd₂Fe₁₄B/Mo/Fe-B 積層膜の磁気特性, 第 41 回 日本磁気学会学術講演会, 2017 年 9 月 19 日 ~ 9 月 22 日, (九州大学, 伊都キャンパス).

⑥ 小池邦博, Nd-Fe-B 系薄膜の界面修飾と保磁力, 第 24 回 みちのく磁性談話会, 2017 年 6 月 3 日 ~ 6 月 4 日 (天童温泉「滝の湯」, 天童). 【招待講演】

⑦ 板倉賢, 福田淳也, 近藤政孝, 西田稔, 石川裕也, 小池邦博, 加藤宏朗, Nd-Fe-B 系モデル磁石の界面微構造と保磁力, S1.27, 日本金属学会 2017 年春期講演大会(第 160 回), 2017 年 3 月 15 日 ~ 3 月 17 日 (首都大学東京, 南大沢キャンパス).

⑧ 近藤政孝, 板倉賢, 西田稔, 小池邦博, 加藤宏朗, 小林圭太, Mo 中間層の有無による Nd-Fe-B/Fe 薄膜磁石の異方性発現機構の解明, P114, 日本金属学会 2017 年春期講演大会(第 160 回), 2017 年 3 月 15 日 ~ 3 月 17 日 (首都大学東京, 南大沢キャンパス).

⑨ K. Kobayashi, D. Ogawa, K. Koike, H. Kato, M. Oogane, T. Miyazaki, Y. Ando and M. Itakura, Fabrication of orientation-controlled nanocomposite Nd₂Fe₁₄B/Mo/α-Fe multilayer films, PS1.152, 8th Joint European Magnetic Symposia (JEMS2016), 21-26 August 2016, (SECC: Scottish Exhibition and Conference Centre, Glasgow, UK).

〔図書〕(計 2 件)

① 加藤宏朗, 小池邦博, (株) エヌ・ティー・エス, 次世代永久磁石の開発最前線, 第 1 編 磁性と構造解析, 第 2 節 交換結合ナノコンポジット磁石の特性発現メカニズム, 2019.

② 小池邦博, 加藤宏朗, (株) 技術情報協会, 磁性材料・部品の最新開発事例と応用技術, 第 3 節 界面制御とネオジム永久磁石の保磁力 ~ ナノ磁石製膜技術によるモデル界面の形成の試み~, 2018.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 板倉 賢

ローマ字氏名: ITAKURA, MASARU

所属研究機関名: 九州大学

部局名: 総合理工学研究院

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 20203078

研究分担者氏名: 稲葉 信幸

ローマ字氏名: INABA, NOBUYUKI

所属研究機関名: 山形大学

部局名: 大学院理工学研究科

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 50396587

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 加藤 宏朗

ローマ字氏名: KATO, HIROAKI

研究協力者氏名: 小林 奎大

ローマ字氏名: KOBAYASHI, KEITA

研究協力者氏名: 大橋 一輝

ローマ字氏名: OHASHI, KAZUKI

研究協力者氏名: 鈴木 拓哉

ローマ字氏名: SUZUKI, TAKUYA

研究協力者氏名: 近藤 政孝

ローマ字氏名: KONDO, MASATAKA

※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。