

## 基板温度が Nd-Fe-B 薄膜の構造に及ぼす影響

鈴木中・野口陽平・大竹充・二本正昭・桐野文良\*・稲葉信幸\*\*

(中央大, \*東京藝大, \*\*山形大)

Influence of Substrate Temperature on the Structure of Nd-Fe-B Alloy Thin Film

Ataru Suzuki, Youhei Noguchi, Mitsuru Ohtake, Masaaki Futamoto, Fumiyoshi Kirino\*, and Nobuyuki Inaba\*\*

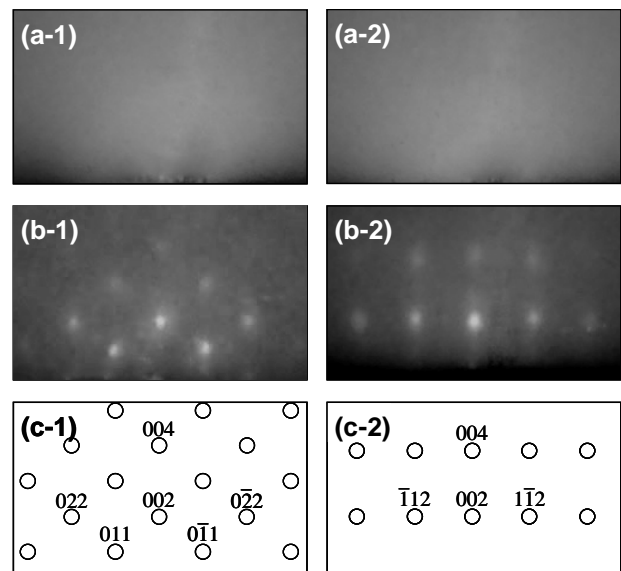
(Chuo Univ., \*Tokyo Univ. Arts, \*\*Yamagata Univ.)

**はじめに** Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 合金は(BH)<sub>max</sub> が極めて高い磁性材料であり、その薄膜はマイクロモータや MEMS などへの応用に向けて研究されている。これまで、ガラス基板、金属基板や単結晶基板を用いて Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 薄膜が形成され、構造や磁気特性が調べられている<sup>1-4)</sup>。薄膜構造は形成温度により敏感に影響されることが考えられる。本研究では、単結晶基板上にヘテロエピタキシャル成長させた Fe 下地層上に温度を変えた条件で Nd-Fe-B 膜を形成し、基板温度が磁性膜構造に及ぼす影響を系統的に調べた。

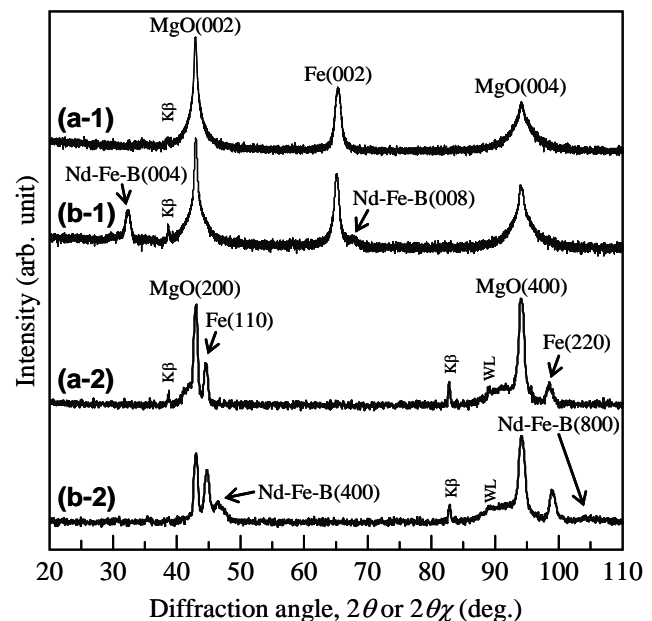
**実験方法** 表面構造のその場観察が可能な反射高速電子回折 (RHEED) 装置付きの超高真空 RF マグネトロンスパッタリング装置を用いて、膜形成を行った。単結晶基板として MgO(001)を用い、その上に 20 nm 厚の Fe(001)下地層を形成した。下地層上に室温から 600 °C の一定基板温度で、20 nm 厚の Nd-Fe-B 膜を形成した。ターゲットとして直径 3 インチの Nd<sub>12</sub>Fe<sub>82</sub>B<sub>6</sub> (at. %) 合金を用い、ターゲット-基板間距離を 150 mm, Ar ガス圧を 0.67 Pa, RF 電力を 40 W とした。このとき、製膜速度は 0.02 nm/s であった。構造評価には RHEED および XRD を用いた。

**実験結果** Fig. 1(a)および(b)に、それぞれ、基板温度 400 および 600 °C で形成した Nd-Fe-B 膜の RHEED パターンを示す。400 °C の場合、ハロー状の回折パターンが観察されており、アモルファス構造を持つ膜が形成されていることが確認できる。基板温度を 600 °C まで上昇させると、鮮明な回折パターンが観察されている。このことから、結晶化が起こりエピタキシャル膜が形成されていることが分かる。RHEED 解析により結晶方位関係を Nd-Fe-B(001)[100] || Fe(001)[110]と決定した。Fig. 2 に 400 および 600 °C で形成した膜の面内および面外 XRD パターンをそれぞれ示す。400 °C で形成した膜に対しては、アモルファス構造を持っているため、Nd-Fe-B 結晶からの XRD 反射を確認できなかった。一方、600 °C で形成した膜の面外パターンにおいては、MgO(002)、Fe(002)反射に加え、Nd-Fe-B(004)反射が明瞭に観察されている。また、面内パターンにおいても、MgO(200)、Fe(110)反射に加え、Nd-Fe-B(400)反射が認められ、RHEED により決定した方位関係を確認できる。

**参考文献** 1) T. Okumoto, K. Yamasawa, X. Liu, M. Mastumoto, and A. Morisako: *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 3139 (2005). 2) M. Nakano, H. Takeda, T. Yanai, M. Itakura, F. Yamashita, and H. Fukunaga: *J. Phys.: Conf. Ser.*, **200**, 082021 (2010). 3) D. Ogawa, K. Koike, S. Mizukami, M. Oogane, Y. Ando, T. Miyazaki, and H. Kato: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **36**, 5 (2012). 4) T. Sato, H. Kato, T. Shima, T. K. Takahashi, and K. Hono: *J. Magn. Magn. Mater.*, **323**, 163 (2011).



**Fig. 1** [(a), (b)] RHEED patterns observed for Nd-Fe-B films deposited on Fe(001) underlayers at (a) 400 and (b) 600 °C. (c) Schematic diagrams of RHEED patterns simulated for a tetragonal Nd-Fe-B(001) crystal. The incident electron beam is parallel to [(a-1), (b-1)] Fe[110] (|| MgO[100]), [(a-2), (b-2)] Fe[100] (|| MgO[110]), (c-1) Nd-Fe-B[100], or (c-2) Nd-Fe-B[110].



**Fig. 2** [(a-1), (b-1)] Out-of-plane and [(a-2), (b-2)] in-plane XRD patterns of Nd-Fe-B films deposited on Fe(001) underlayers at (a) 400 and (b) 600 °C.

## (001)単結晶金属下地層上における エピタキシャル Nd-Fe-B 合金薄膜の形成

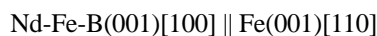
野口陽平・鈴木中・大竹充・二本正昭・桐野文良\*・稲葉信幸\*\*  
(中央大, \*東京藝大, \*\*山形大)

Preparation of Nd-Fe-B Alloy Epitaxial Thin Films on (001) Single-Crystal Metal Underlayers  
Youhei Noguchi, Ataru Suzuki, Mitsuru Ohtake, Masaaki Futamoto, Fumiyoshi Kirino\*, and Nobuyuki Inaba\*\*  
(Chuo Univ., \*Tokyo Univ. Arts, \*\*Yamagata Univ.)

**はじめに** Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 合金は、現在、最も(BH)<sub>max</sub>が高い磁性材料であり、その薄膜はマイクロセンサーやマイクロモーターなどへの応用に向けて研究されている。薄膜基本特性を把握するためには、膜の結晶方位が基板方位により制御されたエピタキシャル膜を用いることが有効である。これまで、エピタキシャル Nd-Fe-B 膜の形成が試みられ、磁気特性などが調べられている<sup>1-4)</sup>。エピタキシャル薄膜成長は下地層材料によって変化することが考えられる。本研究では、同様な条件下で、bcc もしくは fcc 構造を持つ種々の(001)単結晶金属下地層上に Nd-Fe-B 膜を形成し、構造解析を行った。

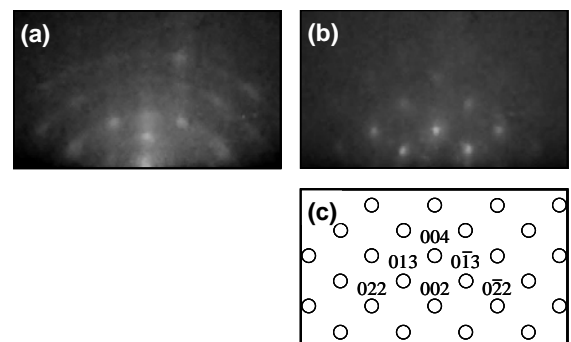
**実験方法** 膜形成には、反射高速電子回折 (RHEED) 装置付きの超高真空 RF マグネトロンスパッタリング装置を用いた。基板として MgO(001)を用い、その上にヘテロエピタキシャル成長させることにより bcc もしくは fcc 構造を持つ(001)単結晶下地層 (Cr, Fe, Au, など)を形成した。下地層上に基板温度 600 °C で 20 nm 厚の Nd-Fe-B 膜を形成した。ターゲットとして、直径 3 インチの Nd<sub>12</sub>Fe<sub>82</sub>B<sub>6</sub> (at. %) 合金を用い、ターゲット-基板間距離を 150 mm, Ar ガス圧を 0.67 Pa, RF 電力を 40 W とした。このとき、製膜速度は 0.02 nm/s であった。構造評価には RHEED および XRD を用いた。

**実験結果** Fig. 1(a)および(b)に、それぞれ、bcc-Cr(001)および bcc-Fe(001)下地層上に形成した Nd-Fe-B 膜の RHEED パターンを示す。Cr 下地層上に形成した膜に対しては、リング状の回折パターンが観察されており、多結晶膜が形成されていることが分かる。一方、Fe 下地層上に形成した膜に対しては、規則的な鮮明な回折パターンが観察されており、膜がエピタキシャル成長していることが分かる。RHEED 解析から決定したエピタキシャル方位関係は以下の通りである。

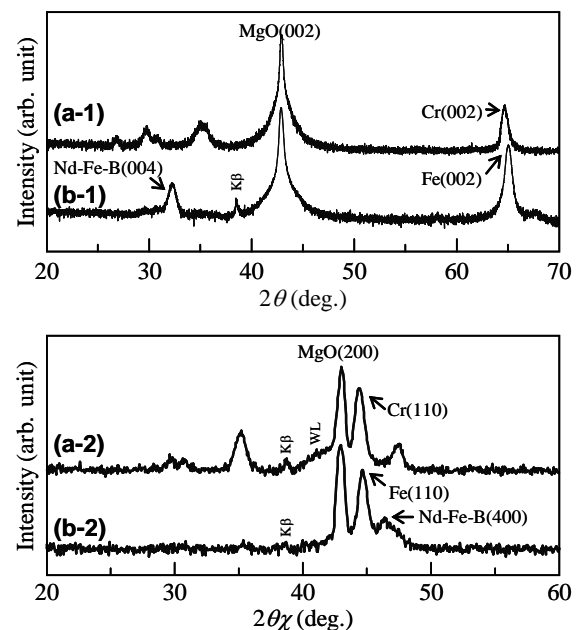


(001)格子が Fe 下地層に対して 45 度回転した方位関係で、単結晶 Nd-Fe-B 膜が形成されていることが分かる。Fig. 2 に面外および面内 XRD パターンを示す。ここで、面内パターンは、散乱ベクトルが MgO[100] (∥ Fe[110]方位)と平行になるように測定を行っている。Cr 下地層上に形成した膜に対しては、多結晶 Nd-Fe-B 膜からの複数の反射を確認できる。一方、Fe 下地層上に形成した膜に対しては、面外パターンで Nd-Fe-B(004)反射が、面内パターンで Nd-Fe-B(400)反射が観察されており、RHEED 解析により決定した方位関係を確認できる。当日は、fcc(001)単結晶基板上に形成した Nd-Fe-B 膜の結果についても報告する。

**参考文献** 1) U. Hannemann, S. Fahler, V. Neu, B. Holzapfel, and L. Schultz: *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 3710 (2003). 2) A. R. Kwon, V. Neu, L. Schultz, and S. Fahler: *J. Appl. Phys.*, **101**, 09K506 (2007). 3) T. Sato, H. Kato, T. Shima, Y. K. Takahashi, and K. Hono: *J. Magn. Mater.*, **323**, 163 (2011). 4) D. Ogawa, K. Koike, S. Mizukami, M. Oogane, Y. Ando, T. Miyazaki, and H. Kato: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **36**, 5 (2012).



**Fig. 1** RHEED patterns observed for Nd-Fe-B films deposited on (a) Cr(100) and (b) Fe(100) underlayers at 600 °C. (c) Schematic diagram of RHEED pattern simulated for an Nd-Fe-B(001) single-crystal. The incident electron beam is parallel to (a) Cr[110], (b) Fe[110], or (c) Nd-Fe-B[100].



**Fig. 2** [(a-1), (b-1)] Out-of-plane and [(a-2), (b-2)] in-plane XRD patterns measured for Nd-Fe-B films deposited on Cr(001) and Fe(001) underlayers at 600 °C. The scattering vector of in-plane XRD is parallel to MgO[100]. The intensity is shown in a logarithmic scale.

## 金属層で拘束した Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 膜の保磁力の温度係数

佐藤 岳、金子 裕治  
(豊田中央研究所)

Temperature coefficient of coercivity of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B film improved by covering metal layer

T. Sato and Y. Kaneko  
(Toyota Central R&D Labs., Inc.)

### はじめに

ハイブリッド車(HV)・電気自動車(EV)モータ用の Nd-Fe-B 系磁石には、耐熱性を確保するためにジスプロシウム(Dy)が使用されている。しかし、希少元素である Dy の使用量の低減が強く要求され、これまでに微粒子化や粒界改質などにより保磁力を向上させる Dy 代替技術が検討されている。本研究では、Nd-Fe-B 系磁石の耐熱性を改善する手法として保磁力の温度依存性に着目した。Nd-Fe-B 系磁石は温度上昇に伴い保磁力が減少するため、保磁力の温度変化を抑制すれば耐熱性の向上が可能と考えられる。

保磁力の温度変化の要因の 1 つは、温度上昇による Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 合金の異方性磁界の減少<sup>1)</sup>である。その異方性磁界の起源である Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B の結晶格子は温度変化によって熱膨張する<sup>2)</sup>。そのため、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B の結晶格子を拘束することで異方性磁界の温度変化を抑制できる可能性がある。本研究では、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 結晶格子の熱膨張の抑制による異方性磁界の温度変化の低減を期待して、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 膜を線膨張率の異なる金属層で被覆した場合の保磁力の温度係数を検討した。

### 実験方法

試料は、超高真空スパッタ装置(到達真空度  $5 \times 10^{-8}$  Pa 以下)にて作製し、膜構成は MgO(100)単結晶基板/ Ta 10 nm/ Nd<sub>2</sub>Fe<sub>81</sub>B<sub>7</sub> 100 nm/ 被覆層 X 100 nm とした。Nd-Fe-B 層の成膜時には 650°C の基板加熱を行い、被覆層 X は 50°C 以下に冷却した後に Nd-Fe-B 層上に成膜した。作製した Nd-Fe-B 層の表面は負の線膨張率を持つ Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 相の c 面であるため、その被覆層 X には正の線膨張率を持つ Mo、Ta、Cr、Cu、Al を用いて熱膨張の低減を図った。磁気特性の評価には、SQUID 磁束計(最大印加磁場 50 kOe)、VSM(最大印加磁場 18 kOe)および磁気トルク計を用いた。また、構造解析は XRD(Cu K $\alpha$ 線源)、微細組織の解析は STEM/EDX にて行った。

### 実験結果

試料の室温での保磁力はいずれも約 8 kOe であったが、高温の保磁力では被覆層 X により差異が見られた。Fig.1 に、被覆層 X に用いた金属の線膨張率に対する保磁力の温度係数を示す。線膨張率の小さい Mo の場合には、温度係数は  $-0.43$  %/°C であったが、線膨張率の増加と共に  $-0.30$  %/°C まで向上した。この被覆金属による温度係数の変化は、被覆層 X の線膨張率の増加により Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 結晶格子の拘束がより強くなったためと推察される。

金属被覆により保磁力の温度係数が変化した要因を明らかにするため、200°C での異方性磁界の評価を行った。温度係数への効果が小さい Mo では 22 kOe であったが、改善が見られた Cu では 30 kOe と約 1.5 倍の値を示し、保磁力の温度係数への金属被覆の効果が高温での異方性磁界の向上に起因することがわかった。

以上のように、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 結晶粒に熱膨張差の大きい金属を被覆することで保磁力の温度係数の向上が確認された。

### 参考文献

- 1) S. Hirose et al., *J. Appl. Phys.*, **59**, 873(1986).
- 2) A.V. Andreev et al., *Sov. Phys. Solid State*, **27**, 987 (1985).

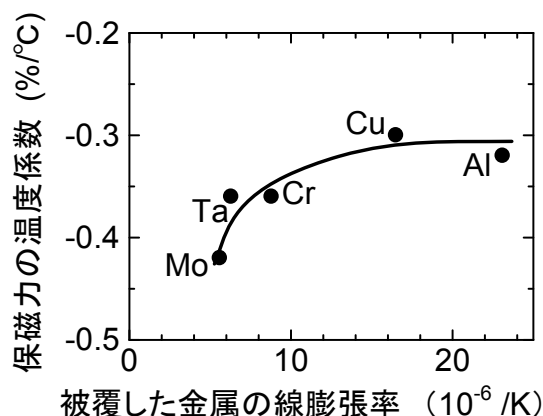


Fig.1 Nd-Fe-B/X (= Mo, Ta, Cr, Cu, Al)膜の被覆した金属 X の線膨張率(27°Cにおける値)に対する保磁力の温度係数の変化。

## Nd-Fe-B 薄膜磁石の作製および磁気特性

馬闖、王斯遠、劉小晰  
(信州大学)

Fabrication and magnetic properties of Nd-Fe-B thin films  
Chuang Ma, Siyuan Wang, Xiaoxi Liu  
(Shinshu University)

## はじめに

Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 化合物を主相とする Nd-Fe-B 磁石は鉄を主成分とし、比較的豊富に存在する希土類金属である Nd と微量な B を添加することによってその他の磁石より保磁力が大きく、価格面にもメリットがある。Nd-Fe-B 磁石は機械的強度に優れ、磁束密度が高く、非常に強い磁力を持つため、ハイブリッド自動車や電気自動車用のモータを初めとする省エネルギー機器などに使われている。本研究では、下地層に W/Ti 二層膜を用いて Nd-Fe-B 薄膜を作製し、その磁気特性、結晶構造の評価を行った。

## 実験方法

薄膜磁石形成には対向ターゲット式スパッタリング装置と DC マグネトロンスパッタリング装置を用いた。スパッタ時の真空到達圧力は  $2.0 \times 10^{-6}$  Torr 以下とした。スパッタ時の Ar ガス圧を 1.2 mTorr~2.0 mTorr で 0.2 mTorr ずつ変化させる。W/Nd-Fe-B/W/Ti の薄膜を熱酸化シリコン (SiO<sub>2</sub>/Si) 基板上に作製した。下地層形成時の基板温度を 300 °C に設定し、Ti を膜厚 5 nm で形成後、W を膜厚 20 nm で形成した。磁性層の Nd-Fe-B を基板温度  $T_s=100$  °C~400 °C で 100 °C ずつ変化させ膜厚 50 nm で形成した。酸化防止膜として W を膜厚 20 nm で作製した。薄膜形成後に真空熱処理装置を用いて 800 °C で 5 分間真空中熱処理を施し、その時の到達圧力は  $1.6 \times 10^{-6}$  Torr 以下とした。

真空熱処理を施した試料を振動試料型磁力計 (VSM) で初磁化曲線およびヒステリシスループによる磁気特性を測定した。その時の最大印加磁場は 24 kOe とした。X 線回折装置 (XRD) を用いた試料の結晶構造の解析を行った。

## 実験結果

Fig.1 に基板加熱を 400 °C で、Nd-Fe-B 層を 25 nm と 50 nm をそれぞれ成膜した W/Nd-Fe-B/W/Ti 四層膜の M-H ループを示す。膜厚を増加させると、膜厚が 25 nm の試料の初期磁化曲線ではピンニング効果が見られたが、50 nm の試料では見られなかった。Fig.2 に膜厚を 50 nm とし、スパッタ温度を 100 °C、200 °C で作製した時の M-H ループを示す。これらの実験からは磁性層の膜厚が一定で、スパッタ温度を変化させると、温度の上昇に伴って垂直方向の保磁力がほぼ同じ値となったが、面内方向の保磁力が減少する。基板温度の上昇によって結晶配向が促進した。400 °C 付近で 50 nm を成膜した場合は垂直磁気異方性を有していることが分かる。

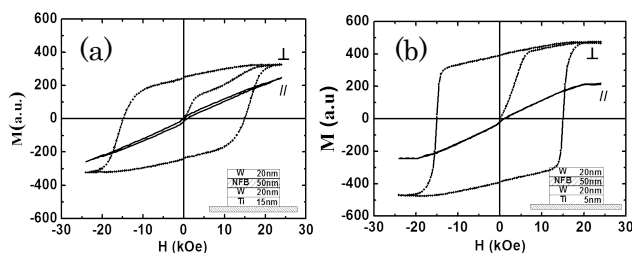


Fig.1 Hysteresis loop of Nd-Fe-B Film  
with thickness of (a) 25 nm, (b) 50 nm

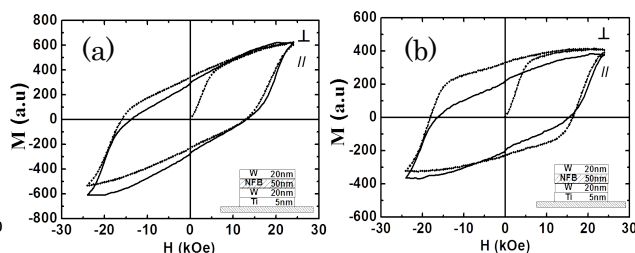


Fig.2 Hysteresis loop of Nd-Fe-B Film prepared of  
substrate temperature of (a)  $T_s = 100$  °C, (b)  $T_s = 200$  °C

# Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B/M (M = Nd, Mo)/Fe 薄膜の磁気特性に与える中間層効果

○小池邦博<sup>1</sup>, 大平悠介<sup>1</sup>, 小川大介<sup>1</sup>, 水野善幸<sup>1</sup>, 宮崎孝道<sup>2</sup>, 安藤康夫<sup>2</sup>, 加藤宏朗<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>山形大学, <sup>2</sup>東北大学)

Effect of interlayer on magnetic properties of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B/M (M = Nd, Mo)/Fe thin films

○K. Koike<sup>1</sup>, Y. Ohira<sup>1</sup>, D. Ogawa<sup>1</sup>, T. Miyazaki<sup>2</sup>, Y. Ando<sup>2</sup>, and H. Kato<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Yamagata Univ., <sup>2</sup>Tohoku Univ.)

## はじめに

大きな最大エネルギー積( $BH$ )<sub>max</sub>をもち、且つレアメタルフリー磁石を実現する候補として異方性ナノコンポジット型ネオジウム永久磁石<sup>[1]</sup>が提案されている。しかしこのナノコンポジット磁石が従来型のネオジウム磁石特性を越えた結果はわずかであった。近年この原因を説明可能な計算や実験としてNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B最表面と接するFe層のスピンの配置が接合面によって異なる面方位依存性を持つことが報告されている<sup>[2],[3]</sup>。一方、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B単層の( $BH$ )<sub>max</sub>を越えるNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B/Ta/Fe-Co積層膜が作製され、高い $H_c$ と( $BH$ )<sub>max</sub>の同時実現にはTa層の導入が必須であると報告されている<sup>[4]</sup>。そこで本研究では、単結晶Mo(111)下地層上へ成長させた高 $c$ 軸配向Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B層とFe層の間に数nmのM(M = Nd, Mo)中間層を挿入し、その磁気特性に与える影響を検討する。

## 実験方法

UHV同時スパッタ法を用いてAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001)基板上へMo(20 nm)/Nd-Fe-B( $t_{\text{NFB}} = 40$  nm)/M( $t_M = 1$  nm)/Fe(5 nm)/Mo(10 nm)の膜構成で、中間層のM元素をNdおよびMoとした試料を作製した。Mo層とNd-Fe-B層、ならびにNd層のArガス圧を各々0.07 Paと0.2 Pa, 0.065 Paとした。Mo(111)下地層上に600°CでNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B層を成長させた後、室温まで冷却して中間層、Fe層の順で各層を堆積し、最後に保護層としてMo層を堆積した。磁化曲線はVSM, SQUIDを用いて測定した。結晶構造と配向状態ならびに膜断面構造はXRDおよびTEMで評価した。また、AFMおよびSEMで表面形態を評価し、組成をEDSで分析した。

## 結果

Fig.1の減磁曲線からNd-Fe-B単層膜が高い $c$ 軸配向状態を反映した高角形性を有しており、このNd-Fe-B膜へFe層を直接堆積したNd-Fe-B/Fe膜の角形性や残留磁化 $M_r$ 、また保磁力 $H_c$ の値は、Nd-Fe-B膜の値よりも低下していることが分かる。一方、MoおよびNd中間層を導入した試料について12 kOeでの磁化値を見ると、Mo中間層を持つ膜に比べてNd中間層を持つ膜が単層膜の値よりも増加しており、 $H_c$ は中間層を持つ両膜とも単層膜の値よりも大きく、特にMo中間層膜は単層膜の値にほぼ回復していることが分かる。このように1 nmの薄い中間層であっても元素の違いが、Nd-Fe-B/M/Fe薄膜の磁気特性に影響を与えることが明らかとなった。講演ではこの原因について微細構造観察と合わせた考察した結果も合わせて報告する予定である。

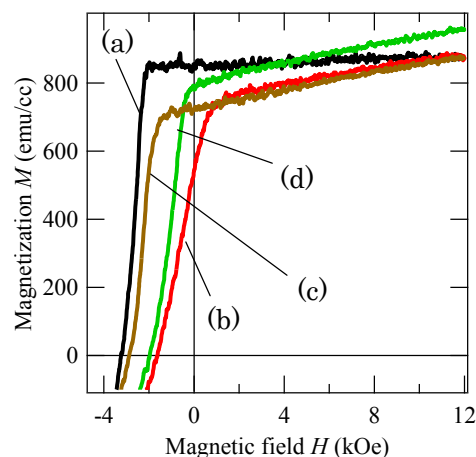


Fig.1 Demagnetization curves for (a)Nd-Fe-B, (b)Nd-Fe-B/Fe, (c) Nd-Fe-B/Mo/Fe, and (d) Nd-Fe-B/Nd/Fe thin films.

## 謝辞

本研究の一部はJST産学共創基礎基盤研究プログラムおよびSUZUKI財団の支援を受けた。

## 参考文献

- 1) R. Skomski and J.M.D. Coey, *Phys. Rev. B* 48, **1993**, 15812.
- 2) Y. Toga, H. Moriyama, H. Tsuchiura, A. Sakuma, *J. Phys. Conf. Ser.*, 266, **2011**, 012046.
- 3) D. Ogawa, K. Koike, S. Mizukami, M. Oogane, Y. Ando, T. Miyazaki and H. Kato, *J. Mag. Soc. Jpn.*, 36, **2012**, 5.
- 4) W. B. Cui, Y.-K. Takahashi, and K. Hono, *Adv. Mater.* 2012 doi: 10.1002/adma.201202328.

## Nd-Fe-B 薄膜および Nd-Fe-B/Nd 薄膜の磁気粘性測定

後藤龍太, 岡本聡, 菊池伸明, 北上修  
(東北大学 多元物質科学研究所)

Magnetic viscosity measurements of Nd-Fe-B and Nd-Fe-B/Nd thin films

R. Goto, S. Okamoto, N. Kikuchi, and O. Kitakami  
(IMRAM, Tohoku Univ.)

## 諸言

Nd-Fe-B 系焼結磁石は, Dy 等の希少な重希土類元素を添加し, 保磁力を高めることで, 耐熱性を高め, ハイブリッド自動車などの駆動用モーターに応用されている. 重希土類の添加量削減と高い磁気特性を同時に実現するためには, Nd-Fe-B 系磁石の磁化反転挙動の理解が不可欠である. 有限温度下における磁化反転は熱活性プロセスに従い, その反転確率を決めるパラメータがエネルギー障壁 ( $E_b(H)$ ) である. エネルギー障壁は, 磁場の関数  $(1-(H/H_0))^n$  として与えられ, そのべき乗数  $n$  は一斉回転において 2, 磁壁ピンニング (weak pinning) において, 1 となることが知られている. ここで,  $H_0$  は熱揺らぎの影響がない場合の保磁力である. したがって, 反転過程のエネルギー障壁の関数形を実験的に評価できれば, 磁化過程機構における重要な知見が得られるものと期待している. 本研究では, Nd-Fe-B 系薄膜の磁気粘性測定から揺らぎ場 ( $H_f$ ) を求め, また, 保磁力の時間依存性との比較により  $E_b$  の関数形に関する考察を行った.

## 実験方法

$c$  軸が基板面直方向に配向した Nd-Fe-B 薄膜は, 超高真空マグネトロンスパッタ装置を用いて Mg(001) 単結晶基板上に作製した. Nd-Fe-B 薄膜は, 3 元同時スパッタリングにより作製し, 設計組成は  $\text{Nd}_{12.5}\text{Fe}_{78.4}\text{B}_{9.1}$  (at%) とし, 試料の構造は, MgO sub./Mo(30)/Nd(0.25)/Nd-Fe-B(50)/(Nd( $t_{\text{Nd}}$ ))/Mo(10) (単位: nm) とした.  $t_{\text{Nd}}$  は Nd 層の膜厚で,  $t_{\text{Nd}} = 0$  (Nd-Fe-B 薄膜) または 1 nm (Nd-Fe-B/Nd 薄膜) とした. 磁気粘性計測は異常ホール効果により行い, 各磁場における測定は試料を完全に飽和させるため, 4 T で着磁した後, 所定の磁場で 3600 秒保持することにより行った.

## 実験結果

Nd-Fe-B(Nd)薄膜は, とともに高い角型性を示し, 保磁力は,  $t_{\text{Nd}} = 0$  nm および  $t_{\text{Nd}} = 1$  nm でそれぞれ 0.5 T および 1.0 T であった. Nd-Fe-B 薄膜試料の磁気粘性測定結果の例を Fig. 1 に示す. 磁気粘性曲線の傾きより,  $H_f$  を求めた<sup>1)</sup>ところ, 概ね 7 mT 程度であった. 磁気粘性曲線の  $M/M_s = 0$  との交点から,  $H_c$  の時間依存性を得た. これを熱揺らぎの解析式である Sharrock モデル<sup>2)</sup>を用いたフィッティング結果と比較することにより,  $E_b$  の磁場依存性におけるべき乗数  $n$  の値を評価した. その結果,  $t_{\text{Nd}} = 0$  nm では,  $n = 1.2_{-0.20}^{+0.40}$ ,  $t_{\text{Nd}} = 1$  nm では,  $n = 1.2_{-0.30}^{+0.50}$  となった. このことは, Nd 被覆の有無により関数形がほぼ変化しないことを示しており, Nd 被覆の結果, 保磁力が増大した場合でも, 反転過程自体は同様の機構である可能性を示唆するものである.

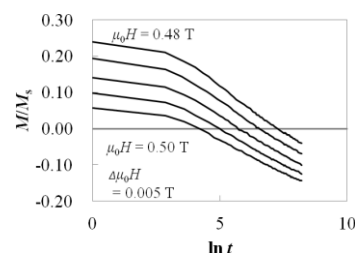


Fig.1 An example of magnetic viscosity measurements for a Nd-Fe-B film.

## 参考文献

- 1) El-Hilo *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **248** (2002) 360.
- 2) M. P. Sharrock, IEEE Trans. Magn. **26** (1990) 193.

## 謝辞

本研究の一部は, 文部科学省の委託事業である元素戦略磁性材料研究拠点および文部科学省科学研究費補助金 (No. 24360261) により行われた.