

アモルファス CoFeSiB 薄膜の磁気特性におよぼす金属元素添加効果

神保睦子, 野末周平, 藤原裕司
(大同大, 三重大)

Influence of additive elements on magnetic properties of CoFeSiB films

M. Jimbo, S. Nozue, and Y. Fujiwara
(Daido Univ., Mie Univ.)

はじめに

磁歪がほぼゼロを示すアモルファス(a-)CoFeSiB 合金は、保磁力は 0.1Oe 以下で、高透磁率を示す非常に優れた軟磁気特性を示すため¹⁾、薄膜化して磁気センサー等への応用が考えられている。しかし、a-CoFeSiB 合金は薄膜化すると結晶化温度が低下してしまう。そこで、a-CoFeSiB 薄膜に結晶化温度の上昇を期待して Zr などの金属元素を添加し、その耐熱性を評価した。ただし、a-CoFeSiB 薄膜に金属元素を添加した場合、磁歪が変化してしまうことが予想される。そこで、金属元素の添加にともなう磁歪の変化も評価した。

実験方法

試料は、RF スパッタ装置を用い、ガラス基板上に成膜した。スパッタ装置の到達真空度は 6×10^{-5} Torr 以下、スパッタガスは Ar 6mTorr である。ターゲットには、CoFeSiB ターゲットに金属チップ(Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, W)を配置した複合ターゲットおよび CoFeSiBHf 合金ターゲットを使用した。膜厚は約 500nm であり、表面には酸化防止のため SiN を 10nm 成膜した。また、試料は 2×10^{-5} Torr の真空中で 1 時間磁界中熱処理を行った。熱処理温度は、200°C から 400°C である。VSM で磁化曲線を測定し、XRD により構造解析を行った。また、磁気トルクメータ、光楯子式磁歪測定により磁歪を評価した。

実験結果

金属元素の添加量が概ね 3 - 5 at.% の試料の磁化測定から、Ti, Cr を添加したものをのぞいた as-dep. 試料の保磁力 Hc は 0.1 - 0.3 Oe 程度の良好な特性を示した。Fig.1 に 350°C 1 時間熱処理した後の Hc を示す。横軸は原子半径である。原子半径の大きな元素では、Hc の増加が小さいことから、原子半径の大きな元素の添加が耐熱性の向上に効果的であることがわかる。特に Hf の添加が効果的であった。ただし、Hf 添加により、飽和磁化 $4\pi M_s$ が 10kG から約 8kG に低下した。そこで、メタロイド組成、Hf 組成を制御したターゲットを使用し、飽和磁化の増大を検討した。その結果、 $\text{Co}_{77.7}\text{Fe}_{4.1}\text{Si}_{3.2}\text{B}_{8.8}\text{Hf}_{6.2}$ の組成で、as-dep. で $4\pi M_s=11.7\text{kG}$, $H_c=0.14\text{Oe}$ 、300°C 1 時間熱処理後に $4\pi M_s=11.7\text{kG}$, $H_c=0.76\text{Oe}$ という良好な結果を得た。a-CoFeSiBHf 薄膜の磁歪の変化の様子を Fig.2 に示す。横軸は CoFe 組成に対する SiB 組成比である。組成比の減少にともなう磁歪は増加しており、約 4ppm まで増加した。組成制御により耐熱性を保ったまま $4\pi M_s$ は改善できたが、磁歪が増加する結果となった。当日は、飽和磁化・磁歪特性を維持したまま、耐熱性を向上させるために行った組成制御にともなう各種特性・構造の変化に関する詳細な報告を行う。

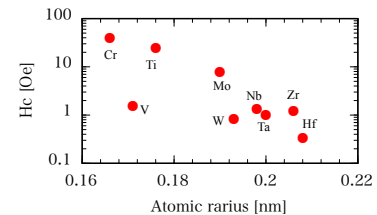


Fig.1 Dependence of Hc on atomic radii of additive elements after annealed at 350°C, 1 hour.

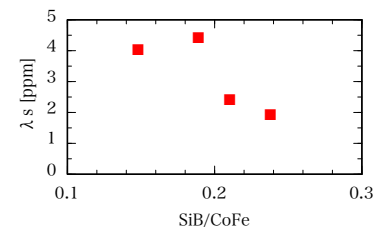


Fig.2 Dependence of saturation magnetostriction on composition ratio.

参考文献

- 1) 例えば H.Fujimori and N.S.Kazama : Sci. Rep. RITU, A-27 (1979) 177.

高周波励磁のナノ結晶リアクトルコアの鉄損特性

塚田 航平* 藤崎 敬介* 進藤 裕司** 吉川 直樹** 吉竹 徹真**
(*豊田工業大学, **川崎重工業株式会社)

Iron Loss Characteristics of Nanocrystal Reactor Core of Road High Frequency Excitation

*Kohei Tsukada, *Keisuke Fujisaki, **Yuji Shindo, **Naoki Yoshikawa, **Tetsuma Yoshitake
(*Toyota Technological Institute, **Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

はじめに

リアクトルはインバータの出力フィルタなどで使用されており、リアクトル設計等のために、周波数および材料の違いによる損失の特性解明が待たれている⁽¹⁾。そこで今回、正弦波励磁を用いて 6.5 %Si 材リアクトルとナノ結晶材リアクトルの磁気特性を比較したので、以下に述べる。

評価・実験方法

試験回路を Fig. 1. に示す。本試験では、正弦波を用いてリアクトルを励磁する。使用したリアクトル材料は、ナノ結晶材料および、6.5 %Si 材料である。また、励磁条件は基本周波数 500 Hz、1k Hz とし、2つの周波数条件で比較した。

本試験ではリアクトルコアの最大磁束密度 B_m を 1.0 T、リアクトル間の空隙幅を 2 mm とし、励磁条件を統一した。今回、最大磁束密度は 2 次側の励磁電圧 V_2 を測定し、次式で算出する。

$$B_m = \frac{1}{n_2 S} \oint V_2 dt$$

ここで、 n_2 は二次側の巻線数 (= 5 turns)、 S はリアクトル断面積である。また、今回評価を行うリアクトルに生じる損失(鉄損) W は次式で算出される。

$$W = P_{re} - I_{re}^2 R_{re}$$

ここで、 P_{re} はリアクトル間に生じる電力、 I_{re} はリアクトルに流れる電流、 R_{re} はリアクトル巻線抵抗である。

測定結果と考察

Fig.2. に 6.5 %Si 材リアクトルとナノ結晶の鉄損を比較した結果を示す。500 Hz において、ナノ結晶材と 6.5 %Si 材の鉄損は 31~34 W 程と差がないが、1000 Hz に周波数を増加させたとき、ナノ結晶材のリアクトルの鉄損増加率は 14 % と小さいのに対して、6.5 %Si 材のリアクトルの鉄損増加率は 68 % と非常に大きく増加することがわかる。

以上の結果より、ナノ結晶材料は高い周波数においてリアクトルに生じる鉄損が小さく、高周波における優れた材料と言える。

参考文献

- 1) S. Odawara, S. Yamamoto, K. Sawatari, K. Fujisaki, Y. Shindo, N. Yoshikawa, T. Konishi "Iron Loss Evaluation of Reactor Core With Air Gaps by Magnetic Field Analysis Under High-Frequency Excitation", IEEE Trans. magn., vol. 51, pp.1-4, no. 11, 2015.

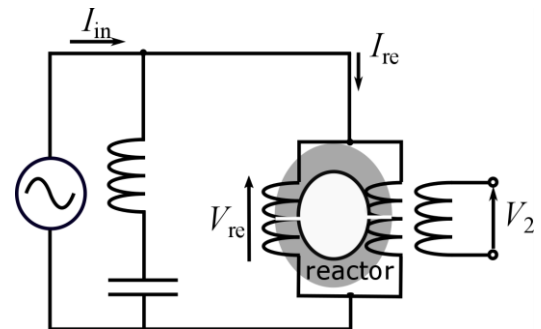


Fig. 1. Reactor iron loss measurement.

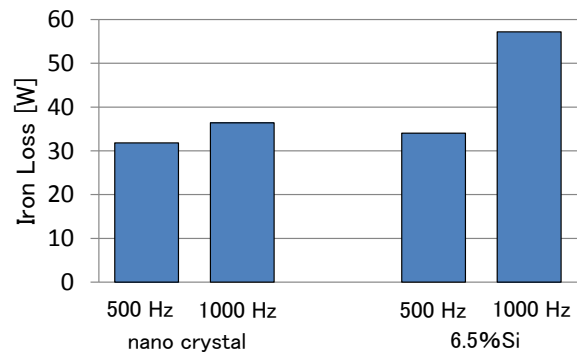


Fig. 2. Reactor core loss at 500 Hz and 1 kHz.

元素添加による MnAl 規則合金薄膜の構造と磁気特性

赤間 稜、土井 正晶、嶋 敏之
(東北学院大)

Effect of additive elements on the structure and magnetic properties for MnAl thin films

R.Akama, M.Doi, T.Shima
(Tohoku Gakuin Univ.)

はじめに

Nd-Fe-B 磁石は高い飽和磁化、保磁力、結晶磁気異方性、最大エネルギー積を有しており、ハイブリッドカー (HV)、エアコン、携帯電話などの小型デバイス等様々な製品に利用されている。しかしながら、希土類磁石は、原料である希土類元素の埋蔵地域・生産地域共に地域偏在性があり、また需要の増大に伴い生産量が年々増加している。そのため現在の Fe 系希土類磁石を代替可能な新たな磁性材料が強く要望されている。そのための磁石材料の候補として Mn 系永久磁石が挙げられる。中でも MnAl 合金の原料は資源に富んでおり、低密度で低材料コストであるため研究価値があるものと考えられる。しかしながら、 $L1_0$ 型結晶構造を示す MnAl 合金の磁気特性、特に飽和磁化は現在使用されている永久磁石材料の代替として使用できる値 (結晶磁気異方性 $K_u = 1.5 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ 、飽和磁化は 480 emu/cc である) はこれまで得られていない。そこで本研究は、初めに組成を変化させた MnAl 規則合金を作製し、最適な Mn 組成の探索を行い、最終的には飽和磁化を増加させるために、Re、Fe、Rh、Pt 等の元素添加により、 $L1_0$ 型結晶構造の格子伸縮による磁気特性の変化を詳細に調べた。

実験方法

試料は超高真空多元スパッタ装置を用いて MgO(100)単結晶基板上に成膜した。到達真空度は $5 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 、成膜時の真空度は 0.132 Pa とした。初めに 700°C において 30 分間基板の表面クリーニングを行い、室温でバッファー層として Cr を 20 nm 成膜した。次に 400°C で MnAl 並びに Re、Fe、Rh、Pt 層を成膜し、 450°C で 60 分間熱処理を行った。最後に室温で酸化保護層として Cr を 10 nm 成膜した。MnAl 薄膜の総膜厚は 50 nm とし、MnAl-Z (Z = Re, Fe, Rh, Pt) 薄膜は総膜厚が 50 nm になるように調整した。結晶構造は X 線回折装置 (XRD)、磁気特性は超伝導量子干渉磁束計 (SQUID)、組成分析はエネルギー分散型 X 線分析 (EDX) により評価した。

実験結果

初めに Mn の組成を変化させ MnAl 薄膜を作製した。Mn の組成は 46.6 から 52.3 (at.\%) まで変化させた。その結果、Mn 組成が 48.2 at.\% において最大の飽和磁化 534 emu/cc が得られ、 46.6 at.\% において最大の保磁力 10.1 kOe が得られた。X 線回折結果より、全ての試料において τ -MnAl の 001, 002 ピークが明瞭に観察された。次に MnAl 層を 10-x nm , Z 層を $x \text{ nm}$ 交互に 5 回積層し、MnAl-Z (Z = Re, Fe, Rh, Pt) 薄膜を作製した。MnAl-Re 薄膜は X 線回折結果から Re 層厚が 0.4 nm において Al_6Re に相当する 002, 004 ピークが観察された。磁気特性を評価した結果、飽和磁化は減少したが、保磁力は増加することが確認された。MnAl-Fe 薄膜においては X 線回折結果より、Fe 層厚が 0.6 nm において FeMn の 210 および Fe の 200 ピークが確認された。飽和磁化は減少したが、角形比は増大することが確認された。MnAl-Rh 薄膜では X 線回折結果より、Rh 層厚が 0.4 nm において RhMnAl の 200, 400 ピークが観察され、飽和磁化は減少したが、角形比の増加が確認された。最後に、MnAl-Pt 薄膜では X 線回折結果より、Pt 層厚が 0.4 nm において PtMnAl の 101, 210 ピークが観察され、飽和磁化は減少したが、角形比と保磁力は増大することを確認した。詳細は講演時に報告する。

Mn-Ga-N 薄膜の窒素量による磁気特性及び結晶構造の変化

中川史崇、土井正晶、嶋敏之
(東北学院大学)

Effect of nitrogen content on the crystal structures and magnetic properties for Mn-Ga-N thin films

F. Nakagawa, M. Doi and T. Shima
(Tohoku Gakuin University)

はじめに

Nd-Fe-B 焼結磁石はハイブリッドカー (HV)、電気自動車 (EV)などに使用されるモーターから、磁気センサーや医療機器等の幅広い分野において応用されているが、硬磁性材料は温度の上昇に伴い熱減磁が生じるため、Dy や Tb などの重希土類元素置換により熱安定性を向上させる必要がある。しかしながら、希土類元素においては埋蔵・産出国の地域偏在性により将来に渡って安定供給の問題があることから、希土類元素を用いない Mn 系新規磁石材料の研究開発が盛んに行われている。ここで、 $D0_{22}$ -MnGa 構造を示す MnGa 合金は高い結晶磁気異方性エネルギーを有しており、先行研究から $D0_{22}$ -MnGa の格子間距離を元素添加などにより制御することにより磁気特性の飛躍的な向上が期待されている。そこで、本研究では軽元素である窒素を $D0_{22}$ -MnGa に添加した試料について結晶構造ならびに磁気特性の変化について報告する。

実験方法

すべての試料は超高真空多元スパッタ装置を用いて作製した。はじめに MgO (100) 単結晶基板上に基板温度を $T_s = 400 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ の間で変化させ、基本組成である Mn-Ga 合金は $\text{Mn}_{70}\text{Ga}_{30}$ (at.%) に調整し、70 nm の膜厚の試料を作製した。その際の窒素流量比は $(\text{N}_2 / (\text{Ar} + \text{N}_2)) = 0 \sim 5 \%$ に変化させた。また酸化保護膜として Cr 層を室温において 10 nm 成膜した。組成は、エネルギー分散型 X 線分析 (EDX)、磁気特性は超伝導量子干渉磁束計 (SQUID)、結晶構造は X 線回折装置 (XRD)、微小角入射 X 線回折 (GID)を用いて評価を行った。

実験結果

窒素流量比を $(\text{N}_2 / (\text{Ar} + \text{N}_2)) = 1, 2, 5 \%$ で固定し、成膜温度を $T_s = 400 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ の間で変化させた試料の XRD パターンより、窒素無添加の試料では成膜温度の上昇に伴い $D0_{22}$ -MnGa 構造の各ピーク位置が高角にシフトすることが確認された。また、磁化曲線より成膜温度の上昇に伴い飽和磁化の増加が確認された。次に、成膜温度を $T_s = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ に固定し、窒素流量比を $(\text{N}_2 / (\text{Ar} + \text{N}_2)) = 0 \sim 5 \%$ の間で変化させた試料の XRD の結果、全ての試料において $D0_{22}$ -MnGa 構造に起因するピークが明瞭に確認された。また、窒素流量比の増加に伴い $D0_{22}$ -MnGa 構造の各ピーク位置が低角にシフトすることが確認された。これより $D0_{22}$ -MnGa 構造の c 軸が増加することが確認され、GID 測定より a 軸は減少することが確認された。以上より、c/a の値は窒素流量比の増加に伴い窒素無添加の試料と比較すると最大で 7% 増加することが得られた。また、窒素を導入していない $\text{Mn}_{70}\text{Ga}_{30}$ (at.%) 薄膜では $M_s = 345$ (emu/cc), $H_c = 4.7$ (kOe), $H_k = 6.9$ (T)、窒素を 5% 導入した $\text{Mn}_{53.8}\text{Ga}_{23}\text{N}_{23.2}$ (at.%) 薄膜では $M_s = 208$ emu/cc, $H_c = 4.9$ (kOe), $H_k = 4.8$ (T)の結果が得られた。詳細は講演時に報告する。

参考文献

- 1) H. Lee, H. Sukegawa, J. Liu, T. Ohkubo, S. Kasai, S. Mitani, K. Hono, *Appl. Phys. Lett.*, 107, 032403 (2015).

Si 基板上に作製した Nd-Fe-B 系磁石膜の厚膜化

山口 雄太*, 中野 正基, 山口 貴士, 下田 慶人, 山下 昂洋,
柳井 武志, 福永 博俊 (長崎大学)

Increase in thickness of Nd-Fe-B film magnets prepared on Si substrates

Y. Yamaguchi, M. Nakano, T. Yamaguchi, K. Shimoda, A. Yamashita, T. Yanai and H. Fukunaga (Nagasaki University)

はじめに

Si 基板上への Nd-Fe-B 系磁石膜の成膜は、主にスパッタリング法を用いた報告がなされており、その際の膜厚は最大で 20 μm 程度である⁽¹⁾⁽²⁾。磁界発生源として更なる厚膜化が期待される中、厚膜化を困難にする原因の一つとして、Nd-Fe-B 系磁石膜が Si 基板より剥離する現象が挙げられる⁽³⁾。我々の研究においても PLD 法を用いて Si 基板上へ Nd-Fe-B 系磁石膜を成膜し、熱処理を施した際に、磁石膜の基板からの剥離現象や、剥離をせずに基板自体の破壊現象が生じることを報告した⁽⁴⁾。加えて、我々は Si 基板の酸化膜（自然酸化膜もしくは熱酸化膜）の厚みが磁石膜と基板の密着性に影響を及ぼすことも最近報告しており、Si 基板の酸化膜厚の増加に従い、剥離や基板破壊が生じずに磁石膜の膜厚も増加できることも確認している⁽⁴⁾。本稿では、酸化膜の代わりに、ガラス下地層を基板と磁石膜の間に挿入することで、磁石膜の磁気特性と機械特性に及ぼすガラス下地層の影響を検討した。

実験条件

真空中度 10^{-5} Pa 程度のチャンバー内で約 10 rpm で回転する Nd-Fe-B ターゲットに Nd-YAG パルスレーザを照射することで Si 基板上にガラス膜ならびに Nd-Fe-B 系厚膜磁石を成膜した。ガラス下地層を用いた実験では、自然酸化膜 (1 nm) 付き Si 基板にガラス板 (松浪硝子 S1111) をターゲットとして用いて成膜し、その後 Nd-Fe-B 系磁石膜を成膜した。レーザパワーは 4 W、ターゲットと基板間の距離は 10 mm に固定した。成膜直後すべての試料がアモルファス構造を有したため、定格出力 8kW の赤外線加熱炉を用いて熱処理時間約 4.0 sec の PA(Pulse Annealing)法により Nd₂Fe₁₄B 相を形成した。磁気特性の測定は VSM、膜組成の評価と試料の表面観察には EDX 付き SEM を用いた。

実験結果

PLD 法でガラス膜を自然酸化膜 (1 nm 厚) 付き Si 基板上に成膜したところ、約 70 $\mu\text{m}/\text{h}$ と比較的高い成膜速度が得られ、ターゲットであるガラス板とガラス膜を構成する元素で少なくとも Si と O の含有量は同程度であった。

Fig. 1 にガラス下地層の有無が破壊現象の抑制に及ぼす影響を示す。従来の熱酸化膜 (500 nm 厚) 付き Si 基板上に成膜した磁石膜 (Fig. 1 中: Δ , \blacktriangle) の場合、Nd 含有量の増加に従い、破壊することなく厚膜化できることが確認される。破壊することなく作製できた試料の界面付近の TEM 観察を行うと、余剰な Nd が粒界相、三重重点に析出するだけではなく、Si 基板と磁石膜の界面近傍にも析出し、熱処理における基板と厚膜磁石の線膨張係数の差を起源とする応力を緩和し、最大膜厚の増加に貢献したものと推察される。しかしながら、化学量論組成よりも多量に存在する Nd は、残留磁気分極ならびに $(BH)_{\text{max}}$ の低下を招くため、好ましくない。一方、自然酸化膜 (1 nm 厚) 付き Si 基板上にガラス下地層を施した場合は (Fig. 1 中: \circ)、従来の熱酸化膜付き Si 基板上に磁石膜を成膜した際に基板破壊 (Fig. 1 中: \blacktriangle) していた領域 (Nd 含有量: 10~15 at.%) の磁石膜の作製を可能にした。ガラス下地層が基板破壊の抑制を可能にする原因の一つとして、Si 基板と Nd₂Fe₁₄B の間の線膨張係数を持つガラスを下地層として挿入したことにより、上記の「余剰な Nd」と同様に熱処理時の応力を緩和したためであると考えられる。すなわち、線膨張係数の差を起源とする応力の緩和に用いる材料を Nd からガラスに変更することで磁石膜内の Nd 含有量を低減しつつ、基板の破壊現象の抑制が可能となった。更に、ガラス下地層の有無による磁気特性の比較をしたところ、磁石膜厚を約 60 μm で固定した場合、熱酸化膜付き Si 基板上に成膜した磁石膜よりも、ガラス下地層を施した磁石膜は Nd 含有量を 4 at. % 程度低減することができ、それに伴い $(BH)_{\text{max}}$ が 20 kJ/m^3 増加することが確認された。(Fig. 2)

参考文献

- (1) 小峠ら, 電気学会マグネティクス研究会資料, vol.169, pp.7-11, (2012).
- (2) R. Fujiwara et al., *Int. J. Automobile Tech.*, vol.7, pp. 148-155, (2013).
- (3) Y. Zhang et al., *Acta Mater.*, vol.60, pp.3783-3788, (2012).
- (4) D. Shimizu et al., 日本磁気学会学術講演概要集, p.145 (2017).

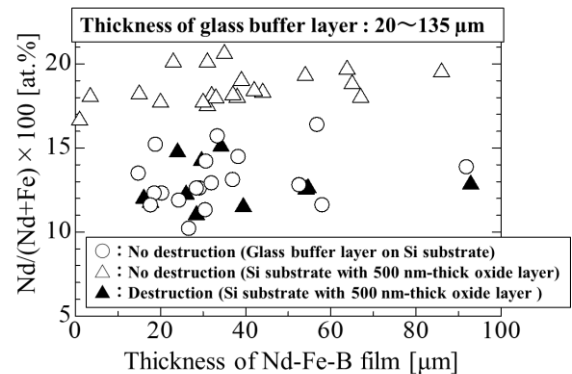


Fig. 1 Relationship between glass under-layers and destruction behavior of Si substrates.

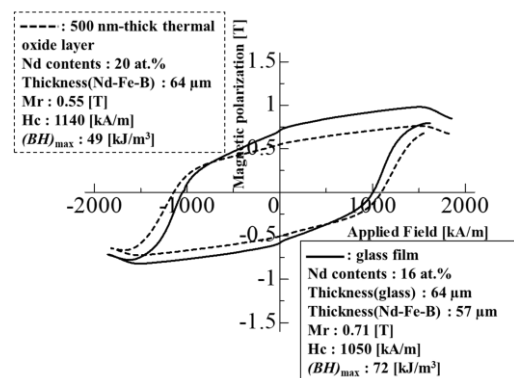


Fig. 2 J-H loops of two Nd-Fe-B films. (1) Deposition on a Si substrate with a 500 nm thick thermal oxide layer. (2) Deposition on a Si substrate with a 64 μm -thick glass buffer layer.

非連続に格子が伸張した $\text{Ce}(\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x)_5$ 薄膜の磁化特性の評価

古我城 航*, 高村 陽太*, 中川 茂樹*, 大橋 健**

(*東京工業大学電気電子系, **信越化学工業)

Magnetic properties of $\text{Ce}(\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x)_5$ films with non-continuous change in crystal lattice

W. Koganoki*, Y. Takamura*, S. Nakagawa*, K. Ohashi**

(*Dept. of Electrical and Electronic Eng., Tokyo Inst. of Tech., **Shin-Etsu Chemical Co., Ltd.)

はじめに

希土類磁石は、希土類原子の局在した 4f 電子雲の異方性に起因する高い結晶磁気異方性を持つ。地球上に豊富に存在する Ce は安価な希土類元素にもかかわらず、4f 電子が価数揺動状態であるため、その化合物は結晶磁気異方性を持たず、現在までほとんど希土類磁石として用いられていない。しかし、Ce の 4f 電子を局在化させることができれば、その異方性が復活し²⁾、ネオジム磁石を置き換える Ce 系磁石ができる可能性がある。4f 電子の局在化は、 CeNi_5 などの Ce 化合物に第三元素を添加していくと、ある組成において結晶格子が非連続的に伸張することから間接的に確認されている³⁾。しかし、これに伴う磁化特性の変化は調べられていない。本研究では $\text{Ce}(\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x)_5$ 薄膜において、Cu 組成 x を増加させることで格子の拡張を行い、その結晶構造と磁化特性を評価した。

実験方法

すべての試料は、熱酸化した Si 基板に対向ターゲットスパッタ法で作製をした。試料の積層構造は、Si 基板/SiO₂/W/Ce(Co_{1-x}Cu_x)₅/W とした。Ce(Co_{1-x}Cu_x)₅ 層は Co ターゲット上に Ce チップと Cu チップを設置して成膜し、組成は Cu チップの枚数により調整した。この層の成膜時間は 30 分、成膜温度は 500°C で固定した。作製した試料の結晶構造は X 線回折法(XRD)で、磁気特性は振動試料型磁力計で評価した。

実験結果

XRD パターンから、すべての組成で CaCu_5 結晶相の形成を確認した。また、 $\text{Ce}(\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x)_5$ の(110)回折と(001)回折のみが現れたことから、c 軸が面内と面直方向に配向した 2 つの結晶粒が混在することがわかった。また、Cu 組成が 0.48 以上では、(110)回折ピークが 2 つに分離した。このことから、Cu 組成が異なる 2 相が形成された可能性がある。(110)の回折ピークから、格子定数 a を算出した。Fig. 1 に Co の Cu 置換率 x に対する a の変化を示す。 a は $x = 0.43$ まではほぼ線形に増加し、2 相分離が生じた $x = 0.48$ で非連続的に変化した。 $x \geq 0.48$ では a は緩やかに変化した。この結果は $x \geq 0.48$ の組成合金中で Ce の 4f 電子の局在化が生じたと解釈できる。

Fig. 2 に $x = 0$ と 0.48 の試料の面内方向の磁化特性を比較する。Cu で Co を置換した試料では、保磁力が大きくなり、外部磁界を 20kOe だけ印加しても磁化は飽和しなかった。今後、低温磁性測定により、Ce 価数変化を磁気特性面から調べる。

参考文献

- 1) C.M. Varama: *J. Phys.*, **48**, 219 (1976).
- 2) B.S. Conner, M.A. McGuire, K.V. Shanavas, D.S. Parker, B.C. Sales: *J. Alloys Compd.*, **695**, 2266 (2017).
- 3) D. Girodin, F. Givord, R. Lemaire, H. Launois, F. Sayetat: *J. Phys.*, **43**, 173 (1982).

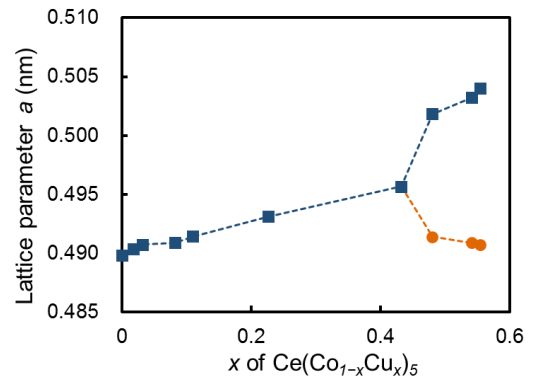


Fig. 1. Variation of lattice parameter a with x in $\text{Ce}(\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x)_5$.

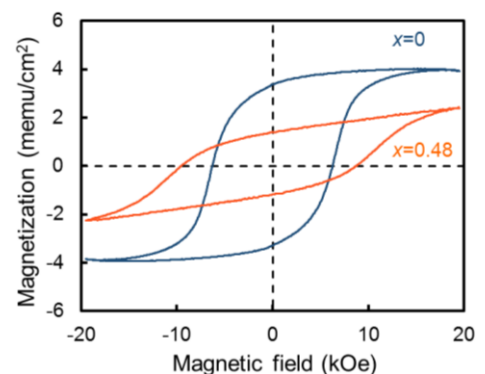


Fig. 2. M - H hysteresis curves for $\text{Ce}(\text{Co}_{1-x}\text{Cu}_x)_5$ with $x = 0$ and 0.48.

合金層拡散による高保磁力 Nd-Fe-B 薄膜の作製

玉澤幸也、土井正晶、嶋敏之
(東北学院大学)

Realization of high coercive Nd-Fe-B thin films by the diffusion of alloy layers

Y. Tamazawa, M. Doi and T. Shima
(Tohoku Gakuin University)

研究背景

Nd-Fe-B 焼結磁石は永久磁石の中でも優れた保磁力、飽和磁化、最大エネルギー積、結晶磁気異方性を有しており、風力発電の発電機や HDD、センサーなどの広い用途で利用されている。特に、環境問題への配慮からハイブリッドカー (HV) や電気自動車 (EV) のモーターへの使用が増加している。しかしながら、HV に使用されるモーターの動作温度は約 200 °C であり、キュリー温度が 315 °C である Nd-Fe-B 磁石は熱減磁により性能が低下する問題がある。そのため、正常に動作させるには室温において約 30 kOe の保磁力が要求され、そのために Nd 元素と重希土類元素の Dy 元素の置換により保磁力向上が行われてきた。しかし、Fe と Dy の反強磁性結合により飽和磁化が低下する問題があり、Dy は埋蔵・生産が特定国に偏在していることから、将来に渡る供給安定性が懸念されている。そのため、重希土類元素を使用せずに高い保磁力を有する Nd-Fe-B 磁石の開発が切望されている。Nd-Fe-B 磁石において保磁力向上には Nd、Cu、Ga などの非磁性元素を粒界相に拡散させ¹⁾、主相である Nd₂Fe₁₄B 相間の磁氣的結合を弱めることが有効であると報告されている。そこで本研究では、Nd-Fe-B 薄膜上に元素の種類や組成、膜厚の異なる非磁性合金層を成膜し、熱処理によって粒界相に拡散させた際の結晶構造と磁気特性への影響を詳細に調査し、高保磁力を示す Nd-Fe-B 薄膜の作製を目的とした。

実験方法

試料は超高真空多元スパッタリング装置を用いて MgO (100) 単結晶基板上に作製した。最初に、基板クリーニングのために 700 °C の基板温度で 20 分間熱処理を行った。バッファー層として Mo 層を室温において 20 nm 成膜し、エピタキシャル成長促進のために 750 °C で 30 分間熱処理を行った。次に Nd-Fe-B 層を 500 °C において 16 nm 成膜し、Nd-Fe-B 層の結晶化と粒界相の形成のために 550 °C で 10 分間熱処理を行った。合金層として Nd_xCu_{100-x} 層を 0.75 nm、Fe_{100-y}Ga_y 層を $t_{\text{Fe-Ga}}$ nm、Nd 層を t_{Nd} nm 500 °C において成膜し、Nd-Fe-B 層の結晶化と合金層の粒界相への拡散のために 550 °C で 50 分間熱処理を行った。最後に、室温で酸化防止層として Mo 層を 10 nm 成膜した。結晶構造は X 線回折装置 (XRD)、磁気特性は超伝導量子干渉磁束計 (SQUID)、組成はエネルギー分散型 X 線分析 (EDX) を使用して評価した。

実験結果

XRD により、全ての試料において主相である Nd₂Fe₁₄B 相の (004) ピークが明瞭に確認された。これより、作製した全ての試料は Nd₂Fe₁₄B 相が形成され、c 軸が基板に対して垂直方向に成長したと確認された。非磁性合金層を成膜していない Nd-Fe-B 薄膜において $H_c = 19.1$ kOe の保磁力を示すことが確認された。続いてこの試料に非磁性合金層を成膜し熱処理を行うことにより、Nd-Fe-B 薄膜の保磁力が顕著に増加することが確認された。この結果は、Nd-Fe-B 層上に成膜した非磁性合金層が熱処理により Nd-Fe-B 層の粒界相に拡散し、主相である Nd₂Fe₁₄B 相間の磁氣的結合を弱めたために保磁力が増加したのではないかと考えられる。最大の保磁力は Nd-Fe-B (16 nm)/ Nd_{35.6}Cu_{64.4} (0.75 nm)/ Fe_{77.1}Ga_{21.9} (0.5 nm)/ Nd (1 nm) 薄膜において得られ、 $H_c = 32.3$ kOe の保磁力を有していることが確認された。この保磁力は現在確認されている重希土類元素を使用していない Nd-Fe-B 系永久磁石において最も高い値である。

参考文献

- 1) R. Nakagawa, M. Doi, and T. Shima, IEEE Trans. Magn. 15302949 11-15 (2015)

Sm(Fe, Co)₁₂ 薄膜の Co 添加による磁気特性の変化

齋藤豪太、土井正晶、嶋敏之
(東北学院大)

Effect of Co-substitution for Sm(Fe, Co)₁₂ thin films and their magnetic properties

G. Saito, M. Doi and T. Shima
(Tohoku Gakuin Univ.)

はじめに

Nd₂Fe₁₄B 相を主相とする Nd-Fe-B 焼結磁石は、現行の商業用永久磁石の中で最も優れた磁気特性を有しており、様々な工業製品に広く応用されている。一方で、1984年に Nd-Fe-B 磁石が発明されて以来、その磁気特性を超える新規磁性材料は発見されておらず、そのような新規材料の開発が強く望まれている。現在期待されている磁性材料のうち、特に ThMn₁₂ 型の結晶構造を有する RFe₁₂ (R: 希土類元素) 系磁石は、R-Fe 系の化合物相の中でも最大の Fe 濃度を有していることから、Nd-Fe-B 磁石を超える優れた磁気特性を発現できるとされている。近年、SmFe₁₂ 薄膜に対して Fe の一部を Co に置換した Sm(Fe, Co)₁₂ 薄膜において、不安定とされる ThMn₁₂ 型結晶構造の安定化と、Nd-Fe-B 磁石を超える一軸磁気異方性と自発磁化が報告され注目を浴びている¹⁾。しかしながら、SmFe₁₂ 薄膜への Co 添加による結晶構造や磁気特性への影響は十分に理解されておらず、その調査が強く要求されている。そこで本研究では、SmFe₁₂ 薄膜及びそれに Co を置換した Sm(Fe, Co)₁₂ 薄膜を作製し、その結晶構造及び磁気特性について詳細に調べた。

実験方法

薄膜試料は超高真空多元スパッタ装置を用いて、MgO (100) 単結晶基板上に作製した。バッファー層として V を 10 nm 成膜し、700 °C に加熱して 30 分間エピタキシャル成長させた。その後、基板温度を 200 ~ 400 °C まで変化させ、SmFe₁₂ 層を 50 nm 成膜した。なお、SmFe₁₂ 層の成膜には Sm と Fe のターゲットを用い、同時成膜によって作製した SmFe₁₂ 合金膜の試料と、Sm 層を t_{Sm} nm、Fe 層を $(1-t_{\text{Sm}})$ nm とし 50 回交互成膜した SmFe₁₂ 積層膜の試料をそれぞれ作製した。その後、酸化保護膜として V を 10 nm 成膜した。作製した試料は、結晶構造を X 線回折装置 (XRD)、磁気特性を超伝導量子干渉磁束計 (SQUID) を用いて評価を行った。

実験結果

基板温度を変化させた SmFe₁₂ 積層膜を作製し、構造及び磁気特性の評価を行った。基板温度の上昇に従い SmFe₁₂ 相からのピーク強度が増加し、 $T_S = 300$ °C において SmFe₁₂ 相からのピークが明瞭に確認された。基板温度を更に上昇させることにより SmFe₁₂ 相からのピーク強度が減少したことから、SmFe₁₂ 積層膜においては $T_S = 300$ °C が最適であるものと考えられる。次に、 $T_S = 300$ °C に固定し、SmFe₁₂ 積層膜の Sm 膜厚 t_{Sm} を変化させた試料の XRD パターンを Fig. 1 に示す。化学両論組成となる $t_{\text{Sm}} = 0.08$ nm の試料では、Fe が過剰となり α -Fe 相からのピークが確認された。 t_{Sm} を増加させることで、 α -Fe 相からのピークは減少し、SmFe₁₂ 相からのピーク強度が増大することが判明した。講演時には SmFe₁₂ 合金膜及び Co を添加した Sm(Fe, Co)₁₂ 薄膜についての結果についても合わせて報告する。

参考文献

- 1) Y. Hirayama, Y.K. Takahashi, S. Hirose and K. Hono., *Scr. Mater.*, **138** (2017) 62-65.

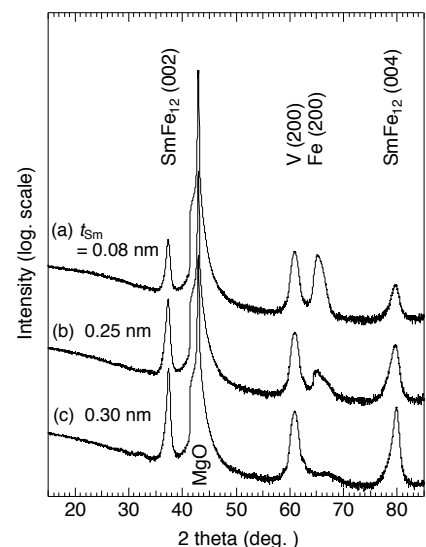


Fig. 1. X-ray diffraction patterns for SmFe₁₂ [Sm (t_{Sm} nm)/ Fe ($1-t_{\text{Sm}}$ nm)]₅₀ stacking thin films with different Sm layer thickness. (a) $t_{\text{Sm}} = 0.08$ nm, (b) 0.25 nm and (c) 0.30 nm.

正方晶化 $\text{Cu}_{1-x}\text{Co}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 粒子の磁気異方性の評価

H. Latiff, 重澤遼, 岸本幹雄, 喜多英治, 柳原英人
(筑波大)

Magnetic anisotropy of tetragonally distorted (Cu,Co) ferrite particles
H. Latiff, R. Shigesawa, M. Kishimoto, E. Kita, and H. Yanagihara
(Univ. of Tsukuba)

はじめに

CoFe_2O_4 は、薄膜試料において正方歪の導入により大きな垂直磁気異方性を発現することが知られている^[1]。微粒子形態において同様の効果を期待し、ヤーン・テラー(JT)イオンである Cu^{2+} を導入した $(\text{Cu,Co})\text{Fe}_2\text{O}_4$ の構造と磁気異方性について以前報告をした^[2]。共沈法およびフラックス法により合成した粒子は立方晶構造をとるが、熱処理を行うことで正方晶系へと変化し、これに伴い保磁力の増大を確認した。本研究では、Co の含有量を変化させ、歪と磁気異方性の依存性を明らかにすることを目的とした。

実験方法

$\text{Cu}_{1-x}\text{Co}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 微粒子は、参考文献 [2] と同様の方法で合成し、 x を 0-0.2 の範囲で変化させた。得られた粒子の結晶構造は XRD により確認し、磁気特性の評価は VSM を用いておこなった。磁気異方性については、磁気トルク測定をおこない各磁場で得られた回転ヒステリシスを用いて異方性磁界を見積もった。

実験結果

Figure 1 に示す XRD パターンから $x=0-0.1$ の範囲では正方晶スピネルで、 $x=0.2$ では立方晶スピネルとった。すなわち $\text{Co}>0.1$ の範囲で Cu の JT 効果が抑制されていることが分かった。飽和磁化は 21-32 emu/g 程度で、逆スピネル構造を仮定して計算した混晶の飽和磁化と比べて同程度の値であった。一方で保磁力は、 $x=0-0.2$ の範囲では $x=0.1$ で最大値を示した(Fig. 1)。Fig. 2 に回転ヒステリシス W_r の磁場変化を示す。まず、Co を含めた $x=0.1, 0.2$ の試料においては、最大磁場 1.9T においても $W_r \neq 0$ となった。これは、2次粒子を形成した1次粒子群同士の粒子間相互作用によるものだと考えられる。Fig. 2 においてピークを越えた後の変曲点から線形的に $W_r = 0$ に外挿し、得られた磁場 H_k を異方性磁界とし x に対する変化を Fig. 2 (inset) に示した。 $x=0.1$ では H_k が最大となり、これは Cu^{2+} による正方歪と Co^{2+} の磁気弾性効果によるものだと考える。磁気異方性の最大化は「歪」と「Co」の両方が必要条件であり、Co が多くなれば歪が抑制されるため $x=0.1$ 付近で最大値を示したものと考えられる。このとき異方性磁界から求めた一軸異方性は約 1.6 Merg/cm^3 であった。

参考文献

- [1] T. Niizeki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **103** (2013) 162407.
[2] H. Latiff *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **53** (2017) 9402304-1.

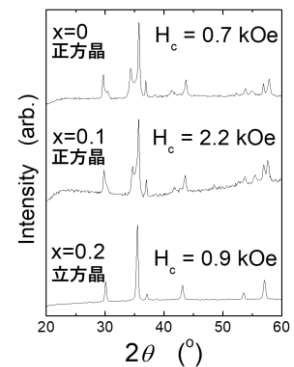


Fig. 1 $\text{Cu}_{1-x}\text{Co}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 粒子の XRD パターン

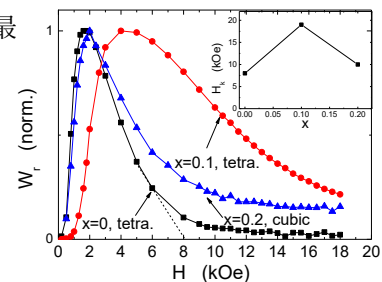


Fig. 2 トルク測定から得られた回転ヒステリシス W_r の磁場変化と異方性磁界(inset)

Fe₃O₄ ナノ粒子における磁気一次反転曲線の形状依存性

亙理択海、菅原昂大、小林悟、村上武、千葉桃子、J. Manjanna*
(岩手大理工、*ラニ・チャンナム大学)

Effect of particle shape on magnetic first-order reversal curves for Fe₃O₄ nanoparticles

T. Watari, K. Sugawara, S. Kobayashi, T. Murakami, M. Chiba, J. Manjanna*
(Iwate Univ, *Rani Channamma Univ)

はじめに

Fe₃O₄ ナノ粒子は高い飽和磁化及び軟磁性を示すため生医学的応用に期待されている。応用には磁化反転機構の定量的理解が必要であるが、特に粒子形態（サイズ、形状）との関連については十分理解されていない。本研究では、ナノ粒子形状が種々の磁気特性に与える影響を探ることを目的として、形状の異なる2種類のFe₃O₄ ナノ粒子を合成し、1次反転曲線(FORC)特性を比較したので報告する。

実験方法

FeSO₄·7H₂O、FeCl₃·6H₂O、KOH、EG、Glycを用いて、同等の粒径サイズで形状の異なる2種類のFe₃O₄ ([切頭多面体]101±9 nm、[八面体]平均粒径:130±2 nm) を溶媒熱合成した。得られた2つの試料に関し、X線回折による結晶構造解析、FE-SEM及びTEMによる形態評価、SQUID磁束計によるFORC測定(T=10~300K、最大磁場H=3kOe、反転磁場及び磁場ステップΔH_r=ΔH=100Oe)を行った。

実験結果

Fig.1に切頭多面体、八面体それぞれの10K、300KにおけるFORC図を示す。ここで、縦軸は相互作用磁場H_u、横軸は保磁力H_cを表す。切頭多面体、八面体のFORC図では共に、H_c軸上のH_c~600 OeにH_c及びH_u方向に幅の広がったFORC分布ピークが観測された。300KではFORC分布ピークの低H_c側へのシフト、幅の広がりの減少が見られた。

得られたFORC図を詳しく解析するため、H_u方向、H_c方向それぞれの強度を積分した保磁力分布ρ(H_c)、相互作用磁場分布ρ(H_u)を作成した。ρ(H_c)では、両試料共に温度の増加に伴った分布強度ピークの低磁場へのシフト、並びに幅の減少が見られた。ρ(H_u)では、フェルバー転位温度(T_v~120K)以下において強度及びピーク幅に、形状による大きな違いは見られなかったが、T_v以上のT=300Kで、切頭多面体で強度の顕著な減少とピーク幅の広がりが観測された(Fig.2)。この結果は、フェルバー転移に伴う磁気異方性変化(正方→立方異方性)が、形状異方性に影響を与えている可能性がある。

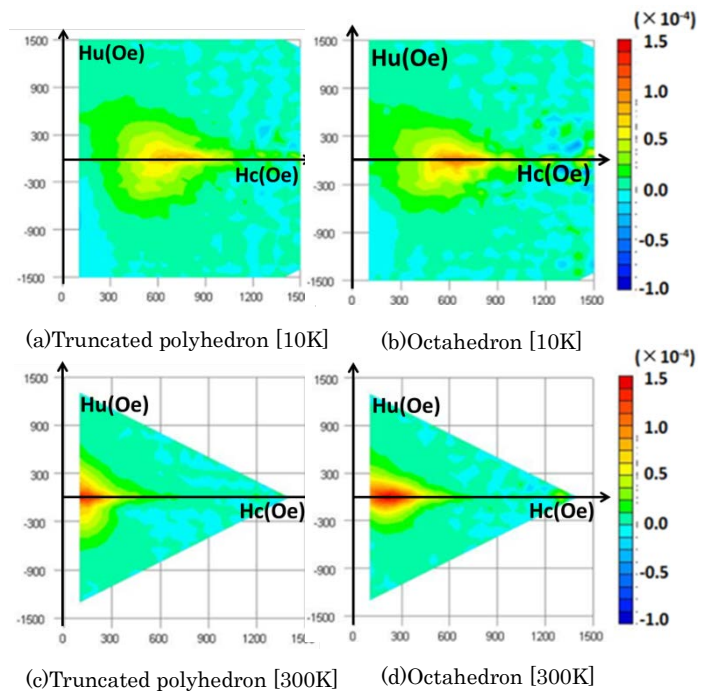


Fig. 1 : FORC diagram, taken at T= 10 and 300 K

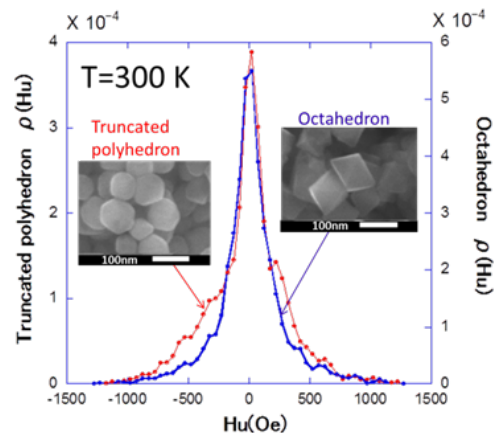


Fig.2 ρ(H_u) as a function of H_u at T=300K

Mg₂SnO₄ 単結晶膜上の Co_{0.75}Fe_{2.25}O₄ 薄膜の歪と磁気異方性制御

小野田 浩成¹, 井上 順一郎¹, 介川 裕章², Sonia Sharmin¹, 柳原 英人¹
(1.筑波大学, 2.物材機構)

Control of epitaxial strain and magnetic anisotropy in cobalt-ferrite thin films on Mg₂SnO₄

H. Onoda¹, J. Inoue¹, H. Sukegawa², S. Sharmin¹, and H. Yanagihara¹

(1. Univ. of Tsukuba, 2. NIMS)

はじめに

MgO(001)上にエピタキシャル成膜されたコバルトフェライト (Co_xFe_{3-x}O₄: CFO) 膜は垂直磁気異方性を示し, その垂直磁気異方性エネルギー K_u は 14.7 Merg/cm³に達する[1]. この CFO/MgO(001)膜における垂直磁気異方性は, 基板との格子不整合 (-0.48%) による磁気弾性効果で生じると理解されている[2]. 我々は Mg₂SnO₄ (MSO)単結晶膜上に CFO 膜をエピタキシャル成長させると, $K_u \sim 60$ Merg/cm³ という Nd₂Fe₁₄B の K_u (~ 50 Merg/cm³)を超える値を示すことを発見した. しかし, 繰り返し実験を行ったところ, 同じ CFO 膜厚に対して歪量が変わっていたり, 同じ歪量でも K_u の値が変わっていたりと成膜条件の詳細が一定となっていないことが分かった. これは, MSO 膜の組成が変化していることが原因だと考えられる. そこで, 本研究では, MSO 膜の組成に着目し, CFO 膜の磁気特性との関連を明らかにすることを試みた.

方法

緩衝層である MSO(001)を単結晶 MgO(001)基板上に Mg 金属ターゲットと Sn 金属ターゲットを用いた 2 元同時反応性 RF スパッタリングにより作製した. Mg 金属ターゲットへの投入電力 P_{Mg} を一定にし, Sn 金属ターゲットへの投入電力 P_{Sn} を変化させることで MSO 膜の組成を変化させた. 続いて, CFO(001)を CoFe 合金ターゲットを用いた反応性 RF スパッタリング法で MSO(001)上に作製した. CFO 膜の作製は, 基板温度 500°C, 酸素流量 8 sccm とした. 試料評価として, 反射高速電子線回折 (RHEED)・X 線回折(XRD)法・磁気トルク測定・磁化測定を行い, 以前に作製した試料と比較した.

実験結果

$P_{Sn} = 16, 18, 22$ W と変化させて作製した MSO 膜の RHEED 像を Fig. 1 に示す. 全ての膜で, ストリークパターンを示したことから, 平坦性の良い膜になっていることが分かる. 大気雰囲気中で 1000°C でアニール処理をしたところ, ストリークパターンはシャープになったが, 平坦性が悪くなったことが分かる. Fig. 2 に, XRD 測定で求めた MSO 膜の格子定数を P_{Sn} についてプロットした結果を示す. 以前に $P_{Sn} = 20$ W で作製した MSO 膜の格子定数と比較すると, 今回 18 W で作製した MSO 膜と格子定数の値とほぼ同じであることが分かった. このことから, MSO 膜の組成 (格子定数) は, ターゲットのスパッタリングレートに依存しており, さらに, ターゲットの状態 (使用時間・表面状態など) にも依存することが考えられる.

講演当日は, 上記に加え, CFO の磁気特性についても議論する.

参考文献

- 1) T. Niizeki *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 162407 (2013).
- 2) J. Inoue *et al.*, IEEE Trans. Magn. **49**, 3269 (2013).

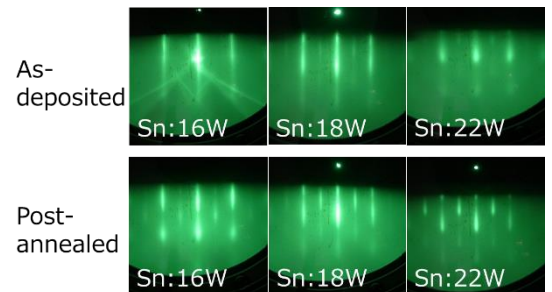


Fig. 1. RHEED patterns of MSO thin films.

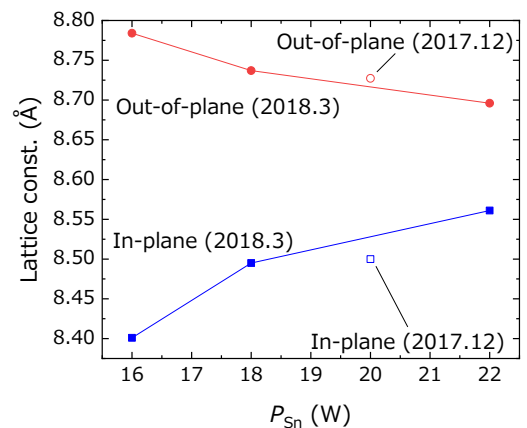


Fig. 2. P_{Sn} dependence of MSO's lattice constants.

有機金属分解法を用いたビスマス鉄ガーネット薄膜の作製および磁気表面プラズモン効果

原田 俊英、芦澤 好人、中川 活二
(日本大学)

Fabrication of bismuth iron garnet films by MOD method and their magneto-plasmonic effect
Toshihide Harada, Yoshito Ashizawa, and Katsuji Nakagawa
(Nihon Univ.)

はじめに

表面プラズモンの励起状態が外部磁界によって変化する磁気表面プラズモン効果¹⁻³⁾が注目されている。磁気表面プラズモン効果は、表面プラズモン励起用金属薄膜と外部磁界に応答する磁性材料の組み合わせにより、大きな効果を得ることが可能になる。誘電性磁性体を用いる検討として、これまで Au/フェライト二層薄膜において磁気表面プラズモン効果を観測してきた³⁾。さらに大きな効果を得るために、磁気光学効果の大きなビスマス鉄ガーネット相に着目し、磁気表面プラズモン効果を検討した。

実験方法

ビスマス鉄ガーネット薄膜は、有機金属分解 (MOD) 法を用いて $Gd_3Gd_5O_{12}$ (GGG) (111)単結晶基板、 $(GdCa)_3(GaMgZr)_5O_{12}$ (SGGG) (111)単結晶基板およびガラス(EAGLE-XG)基板上に作製した^{4,5)}。スピスコートによる MOD 溶液 (高純度化学社製, Bi:Fe = 3:5) の塗布、100°Cにて 30 分間の乾燥、および 450°Cにて 30 分間の仮焼成の工程を 3 回繰り返した後、本焼成による結晶化を行った。本焼成時間は 3 時間一定とし、本焼成温度を 450°C~750°Cで変化した。薄膜の結晶構造解析は X 線回折法 (Cu-K α) を用いて行った。

結果及び考察

種々の本焼成温度 T_a^{cry} で GGG 基板上に作製した薄膜の XRD パターンを Fig. 1 に示す。 T_a^{cry} が 450–550°Cの範囲において、 $2\theta = 50^\circ$ 近傍にガーネット相 (444) 面に起因する回折線が確認された。一方、600°C以上においては、ガーネット相に起因する回折線は観測されなかった。

そこで $T_a^{cry} = 490^\circ\text{C}$ において種々の基板上にビスマス鉄ガーネット相の形成を検討した。結果を Fig. 2 に示す。GGG および SGGG 単結晶基板において、ガーネット相(444)面からの回折線が観測された。ガーネット相の形成には、500°C程度の結晶化温度においてガーネット単結晶上にエピタキシャル成長することが有用であることが示された。本ビスマス鉄ガーネット上に銀を成膜した、銀/ビスマス鉄ガーネット二層構造薄膜において、磁気表面プラズモン効果が観測された。

謝辞

本研究の一部は、マツダ助成金および文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(平成 25~29 年)の研究助成を受けて行った。

参考文献

- 1) J. B González-Díaz et. al, *Phys. Rev. B*, **76**, 153402 (2007).
- 2) T. Tachikawa, et al., *J. Magn. Soc. Jpn.*, **38**, 135 (2014).
- 3) K. Narushima, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 07MC05 (2016).
- 4) S. Ikehara et al, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **36**, 169 (2012).
- 5) E. Jesenska et al., *Opt. Mat. Exp.*, **6**, 1986 (2016).

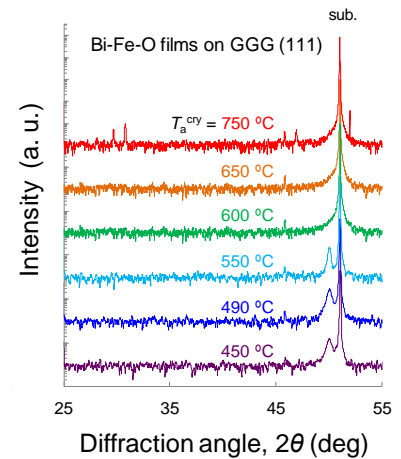


Fig. 1 XRD patterns of Bi-Fe-O films prepared by MOD method at several crystallization temperature.

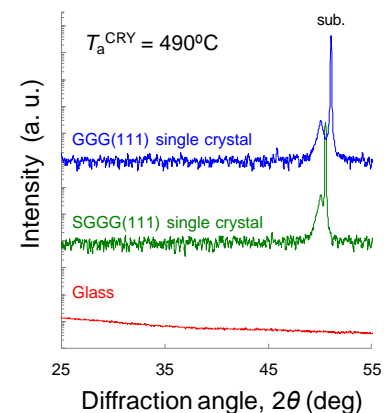


Fig. 2 XRD patterns of Bi-Fe-O films crystallized at 490 °C on GGG, SGGG, and glass substrates.

軟磁性 Ni 基合金単結晶薄膜の磁歪

芹澤伽那^{1,2}・川井哲郎¹・大竹充¹・二本正昭²・桐野文良³・稲葉信幸⁴

(1横浜国大, 2中央大, 3東京藝大, 4山形大)

Magnetostriction of Soft Magnetic Ni-Based Alloy Single-Crystal Thin Films

Kana Serizawa^{1,2}, Tetsuroh Kawai¹, Mitsuru Ohtake¹, Masaaki Futamoto², Fumiyoshi Kirino³, and Nobuyuki Inaba⁴
(¹Yokohama Nat. Univ., ²Chuo Univ., ³Tokyo Univ. Arts, ⁴Yamagata Univ.)

はじめに 磁歪は基本磁気物性のひとつであり、大きさを制御することが応用では要求される。また、磁歪は結晶方位により異なるため、基本特性を把握するためには、方位制御された単結晶膜を用いて調べることが有効である。fcc 構造を持つ Ni 基合金は代表的な軟磁性材料であり、バルク状態では Ni-Fe 合金は小さな磁歪、Ni-Co 合金は大きな磁歪を示すことが知られている¹⁾。本研究では、単結晶 Ni₈₀Fe₂₀ および Ni₂₅Co₇₅ (at. %) 合金薄膜を Cu/Pd/MgO(001), (110) 基板上にエピタキシャル成長させ、回転磁界中における磁歪挙動を調べた。また、これらの合金を積層させた単結晶膜を形成し、磁歪の制御も試みた。

実験方法 膜形成には超高真空 RF マグネトロンスパッタリング装置を使用した。MgO(001), (110) 基板上に Pd 緩衝層を介して Cu(001), (110) 単結晶下地層を形成し、その上に fcc(001), (110) 単結晶 Ni₈₀Fe₂₀(100- t_{NiCo} nm)/Ni₂₅Co₇₅(t_{NiCo} nm) 膜 (t_{NiCo} = 0-100 nm) をヘテロエピタキシャル成長させた。構造解析には RHEED および XRD, 磁化曲線測定には VSM, 磁歪測定には片持ち梁法を用いた。

実験結果 fcc(001) 単結晶 Ni₈₀Fe₂₀(100- t_{NiCo} nm)/Ni₂₅Co₇₅(t_{NiCo} nm) 膜の [100] および [110] 方向に対して 1.2 kOe の回転磁界を用いて測定を行った磁歪の出力波形を Fig. 1(a-1)-(e-1) および 1(a-2)-(e-2) にそれぞれ示す。Ni₈₀Fe₂₀ 単層膜 (Fig. 1(a)) では出力が小さく、Ni₂₅Co₇₅ 単層膜 (Fig. 1(e)) は大きな出力が現れている。また、結晶方位により位相が異なっている。出力波形から求めた Ni₈₀Fe₂₀, Ni₂₅Co₇₅ 単層膜の磁歪定数は、それぞれ、(λ_{100} , λ_{111}) = (3.8×10^{-6} , -14×10^{-6}), (118×10^{-6} , -31×10^{-6}) となった。Ni₈₀Fe₂₀ 膜は非常に小さな磁歪を示しているのに対して、Ni₇₅Co₂₅ 膜では大きな磁歪が観察されている。また、fcc[100] 方向では正、fcc[111] 方向では負の値となっていることが分かる。なお、Ni₇₅Co₂₅ 膜では、fcc[100] および [110] 方向に対して、波形が正弦状ではなく、それぞれ、三角およびバスタブ状に歪んでいるが、これは磁化と回転磁界方向が完全には一致していないために生じているものと解釈される²⁾。

Ni₈₀Fe₂₀ と Ni₂₅Co₇₅ を積層させた場合、磁歪の出力値は単層膜のものの中間となった (Fig. 1(b)-(d))。Fig. 1(f) に λ_{100} および λ_{111} の t_{NiCo} 値依存性を示す。層厚比を変化させることにより、磁歪の大きさを制御できることが分かる。当日は、(110) 単結晶膜の磁歪についても報告する。

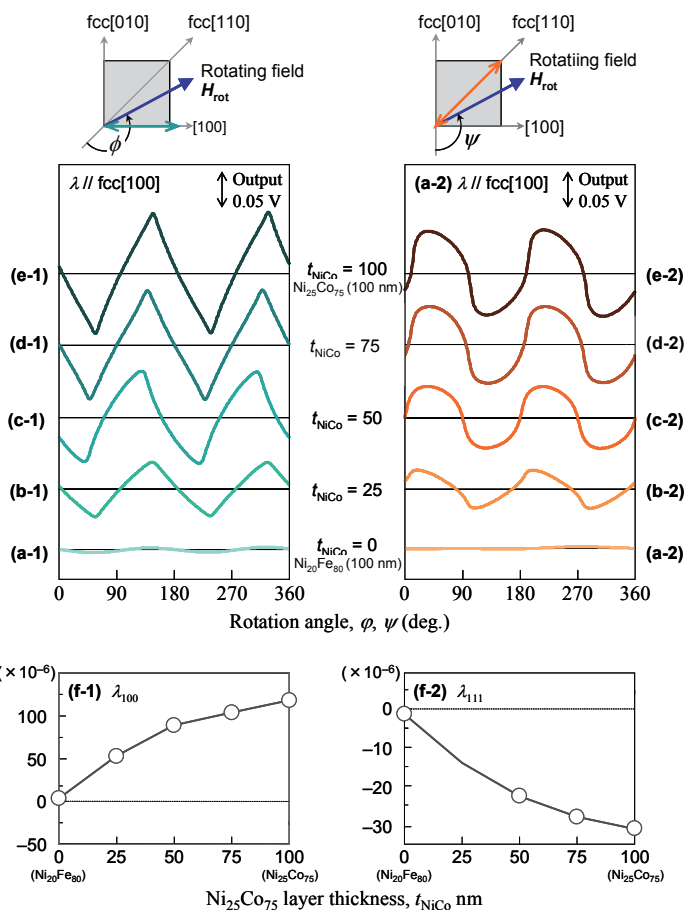
1) S. Ishio, T. Kobayashi, H. Saito, S. Sugawara, and S. Kadowaki: *J. Magn. Magn. Mater.*, **164**, 208 (1996).2) T. Kawai, T. Aida, M. Ohtake, and M. Futamoto: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **39**, 181 (2015).

Fig. 1 Output waveforms of magnetostriction for fcc(001) single-crystal Ni₈₀Fe₂₀(100- t_{NiCo} nm)/Ni₂₅Co₇₅(t_{NiCo} nm) films with t_{NiCo} = (a) 0, (b) 25, (c) 50, (d) 75, and (e) 100 nm measured along (a-1)-(c-1) [100] and (a-1)-(c-2) [110]. Ni₂₅Co₇₅ layer thickness dependences of (f-1) λ_{100} and (f-2) λ_{111} .

$L1_0$ 型 FePt の磁気異方性とキュリー温度に対する Ru 添加効果の第一原理計算

小田洋平

(福島工業高等専門学校)

First-principles calculations of Ru-doping effect on magnetic anisotropy and Curie temperature in $L1_0$ -type FePt

Y. Kota

(National Institute of Technology, Fukushima College)

1 はじめに

強い垂直磁気異方性を示す $L1_0$ 型 FePt は高密度な磁気記録媒体におけるキーマテリアルである。記録密度のさらなる向上のための方針の一つとして熱アシスト方式の研究が盛んに行われているが、 $L1_0$ 型 FePt はその高いキュリー温度 (~750 K) が故に書き込み時の加熱によるエネルギー損失や媒体の損傷が懸念されている。この問題の解決に向けて $L1_0$ 型 FePt 薄膜に対する異種元素添加に関する先行実験があり、FePt に Ru をドーピングすることで強い垂直磁気異方性を維持しつつもキュリー温度を低減できることが報告された¹⁾。そこで本研究では FePt に対する Ru 添加効果の解析を目的に、結晶磁気異方性エネルギーと実効的交換結合定数の第一原理計算を行う^{2,3)}。計算手法は局所スピン密度近似に基づくタイトバインディング線形マフィンティン軌道法を採用し、 $L1_0$ 規則化した FePt に対して (a) Fe の一部を Ru に置換、(b) Pt の一部を Ru に置換、(c) Fe と Pt の一部を Ru に置換した3つの場合を考慮する。元素置換による不規則性はコヒーレントポテンシャル近似の枠内で扱う。

2 結果および考察

Figure 1 に $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ru}_x)\text{Pt}$, $\text{Fe}(\text{Pt}_{1-x}\text{Ru}_x)$, $(\text{Fe}_{1-0.5x}\text{Ru}_{0.5x})(\text{Pt}_{1-0.5x}\text{Ru}_{0.5x})$ の結晶磁気異方性エネルギー ΔE と Fe の実効的交換結合定数 J_0 の Ru 置換量 x 依存性に関する計算結果を示す。ここで実効的交換結合定数とは Fe の周りのスピンの作る有効磁場の大きさに相当するもので平均場近似の枠内ではキュリー温度と比例関係にある。計算結果から Ru 置換によって $L1_0$ 型 FePt の ΔE と J_0 はほぼ一様に減少する傾向が確認される。また実験¹⁾では 6 at.% の Ru 置換 (Fig. 1 では $x = 0.12$ に相当) に対して異方性定数 K_u が 34%, キュリー温度 T_C が 15% 減少しているが、これは $(\text{Fe}_{1-0.5x}\text{Ru}_{0.5x})(\text{Pt}_{1-0.5x}\text{Ru}_{0.5x})$ の計算結果とほぼ等しい。一方で高 K_u かつ低 T_C が実現されるのは $\text{Fe}(\text{Pt}_{1-x}\text{Ru}_x)$ であり、Ru 置換サイトの選択が可能ならばさらなる特性の改善が見込まれる。詳細は講演にて報告する。

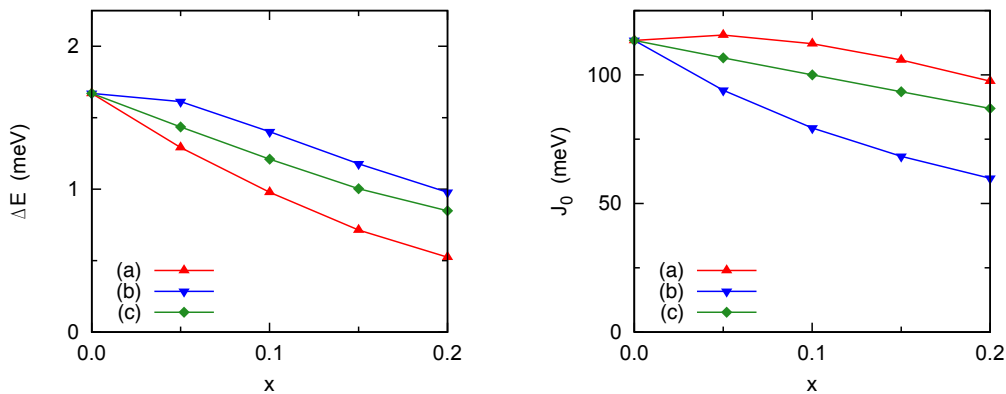


Fig. 1 Calculated ΔE per formula unit and J_0 of Fe atom, where (a), (b), and (c) denote the results for $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ru}_x)\text{Pt}$, $\text{Fe}(\text{Pt}_{1-x}\text{Ru}_x)$, and $(\text{Fe}_{1-0.5x}\text{Ru}_{0.5x})(\text{Pt}_{1-0.5x}\text{Ru}_{0.5x})$, respectively.

References

- 1) T. Ono, H. Nakata, T. Moriya, N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, and T. Shimatsu, *Appl. Phys. Express* **9**, 123002 (2016).
- 2) I. Turek, J. Kudrnovský, V. Drchal, and P. Bruno, *Philos. Mag.* **86**, 1713 (2006).
- 3) Y. Kota and A. Sakuma, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 084705 (2012).

中空構造を有する Fe_3O_4 微粒子における磁気一次反転曲線

千葉桃子、小林悟、村上武、Jayappa Manjanna*
(岩手大理工、*ラニ・チャンナム大学)

Magnetic first-order reversal curve for hollow magnetite fine particles

(M. Chiba, S. Kobayashi, T. Murakami, J. Manjanna)

(Iwate Univ., *Rani Channamma Univ.)

はじめに

中空構造を有する Fe_3O_4 ナノ粒子は、薬物を梱包するドラッグデリバリー等の医療応用に期待されており、実用化の上で、磁化過程の定量的理解が課題の一つになっている。これまで、特に粒サイズが 20nm 程度以下の中空ナノ粒子について、大きな表面効果に起因する強い交換バイアス効果などの特徴的振る舞いが報告されている¹⁾が、粒サイズが数百 nm オーダーの中空 Fe_3O_4 微粒子の磁性についての研究例は少なく、詳しい磁化反転機構は理解されていない。本研究では、粒径・孔径の異なる 2 種類の中空 Fe_3O_4 微粒子について、広温度範囲で一次反転曲線 (FORC) 特性を調べたので報告する。

実験方法

$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 、EG、PG を用いて粒径の異なる 2 種類の中空 Fe_3O_4 微粒子 ([A] 平均粒径: $417.4 \pm 0.8\text{nm}$ 、平均孔径 $211 \pm 1\text{nm}$ 、[B] 平均粒径: $455 \pm 3\text{nm}$ 、平均孔径: $224 \pm 1\text{nm}$) を溶媒熱合成した²⁾ (Fig.1)。X 線回折による構造評価、FE-SEM、TEM による形態評価を行った後、Epoxy 樹脂に微粒子を分散させた試料について、SQUID 磁化測定装置を用いて FORC 測定 (温度 $T=10\sim 300\text{K}$ 、最大磁場 $H=3\text{kOe}$ 、反転磁場及び磁場ステップ $\Delta H_r = \Delta H = 1000\text{Oe}$) を行った。

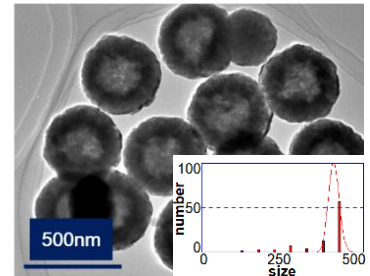


Fig.1 TEM image of sample A and its size distribution.

実験結果

Fig.2 に試料 A における $T=10\text{K}$ での FORC 図を示す。保磁力(H_c)方向に広がった 2 つの FORC 分布ピーク、並びに、 H_c 軸上に細長く尾のように伸びる小ピークが観測された。FORC 図を詳しく解析するため、FORC 分布強度を相互作用磁場方向、保磁力方向にそれぞれ積分した保磁力分布 $\rho(H_c)$ 、相互作用磁場分布 $\rho(H_u)$ を求めた。Fig.2 の FORC 図を反映し $\rho(H_u)$ において 3 ピークが観測された(Fig.3)。 $H_u \sim \pm 500\text{Oe}$ の両端のピークの強度は温度上昇とともに急激に減少し、フェルバー転移付近($T_v \sim 100\text{K}$)で極小値を取った後、 $T \sim 200\text{K}$ で極大を示した。同様な温度依存性は $\rho(H_c)$ のピーク強度でも見られ、主に磁気異方性の温度変化および T_v での構造相転移を反映していると考えられる³⁾。一方、 $H_u \sim 0$ の中央ピークの強度は T_v まで増加後、室温まで緩やかに減少した。温度依存性が異なる 2 種類の $\rho(H_u)$ ピークの存在は、起源の異なる 2 種類の磁化反転機構の存在を示唆している。

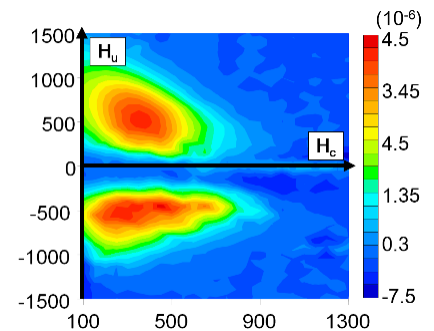


Fig.2 FORC diagram at $T=10\text{K}$ for sample A.

FORC 図での 2 ピークの出現は、単磁区ナノ粒子の低磁場構造の一つとして考えられているスピンドルテクスガ、中空構造でも形成されていることを示唆している。また、試料 A, B 間で $\rho(H_u)$ 、 $\rho(H_c)$ の温度依存性に違いが見られ、粒径に依存した磁化過程を示唆する結果が得られた。

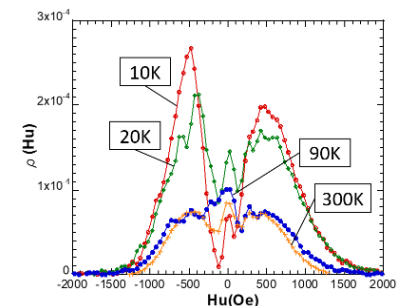


Fig.3 $\rho(H_u)$ at $T=10\text{K}$, 20K , 90K , and 300K for sample A.

参考文献

- 1) H. Khurshid et al., Sci. Rep. 5, 15054 (2015).
- 2) D. T. Nguyen et al., J. Nanosci. Nanotech., 13, 5773 (2013).
- 3) O. Ozdemir et al., Earth Planet. Sci. Lett., 194, 343 (2002).

様々な記録素子形状における磁性細線中への磁区形成シミュレーション

川那真弓、奥田光伸、石井紀彦、宮本泰敬
(NHK 放送技術研究所)

Micromagnetics simulation of magnetic domain formation in magnetic nanowire in various recording element shapes

M. Kawana, M. Okuda, N. Ishii, Y. Miyamoto
(NHK Science & Technology Research Labs.)

はじめに

我々はスピントランスファー効果による磁壁の電流駆動現象¹⁾を利用した小型かつ高速な記録装置の実現を目指し、これまでに既存の HDD 用磁気ヘッドを磁性細線上に接触固定して磁性細線中の磁区形成(記録)・駆動・磁区検出(再生)を一連の動作で実証した²⁾。しかしながら、磁区形成時に HDD 用ヘッドを利用した場合には、記録ヘッドと細線との接触状態によって記録条件が著しく変化し、再現性に問題があった。一方、電流磁界を利用して磁区形成する方法があり、この方法では通常、1つの記録素子からの電流磁界によって磁区を形成するが、記録素子に流す電流量や細線・記録素子間距離によって磁区幅が変化し、微小磁区を形成することは難しいと考えられる。そこで今回、様々な形状の記録素子をモデル化し、記録素子から発生した電流磁界による磁性細線中への磁区形成過程について、マイクロマグネティックシミュレーションを行った。その結果、直線状の記録素子を磁性細線の上側に2つ反平行配置した場合に、電流磁界を効率的に利用でき、乱れの小さい磁区を安定形成できる結果が得られたので報告する。

シミュレーション方法

磁性細線は、長さ $1.6 \mu\text{m}$ 、幅 120 nm 、膜厚 12 nm で飽和磁化 0.25 T 、異方性磁界 $7.06 \times 10^5 \text{ A/m}$ とした。Fig. 1 に磁性細線と電流磁界を発生する記録素子の計算モデルを示す。磁性細線の上側に直交させるように長さ $1.6 \mu\text{m}$ の記録素子を配置し、磁性細線・記録素子間の z 方向距離は 5 nm とした。細線の初期磁化方向は z 方向上向きとし、記録素子に 0.1 A の電流を印加した場合について、LLG 方程式を用いて磁性細線への磁区形成過程を計算した。細線メッシュサイズは 4 nm 一定とした。

シミュレーション結果と考察

Fig. 2(a)に記録素子1のみに+y方向に電流を印加した場合の+z方向から見た磁性細線の磁化状態(電流印加後 0.1 ns)を示す。電流磁界によって記録素子1の+x側の磁性細線に下向き磁区が形成されるが、記録素子からの電流磁界が空間的な分布を持つため、素子から離れた磁壁は揺らぎが大きいことがわかった。次に、記録素子2を素子1の-x方向側に平行に 100 nm 離して位置させ、記録素子2に+y方向、素子1に-y方向の電流を印加した場合の電流印加 0.1 ns 後の磁化状態を Fig. 2(b)に示す。2つの記録素子に電流をそれぞれ逆方向に印加することで、素子に挟まれた磁性細線領域で乱れの小さい磁区が形成された。磁壁乱れが小さくなった理由は、記録素子から発生する同心円状の磁界によって、それぞれの磁壁が2つの記録素子直下で安定化するためであると考えられる。

記録素子1、2のx方向距離を 40 nm と短くし、記録素子2に+y方向、素子1に-y方向の電流を印加した場合の電流印加 0.1 ns 後の磁化状態を Fig. 3に示す。距離を短くした場合にも素子間に下向き磁区が安定形成できることがわかった。このことから、2つの記録素子間距離と電流量を調整することで、磁性細線中に乱れの小さい磁区を形成できると考えられる。

参考文献

- 1) H. Tanigawa *et al.*: *Appl. Phys. Express*, **2**, 053002 (2009).
- 2) M. Okuda *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **52**, (7), 3401204 (2016)

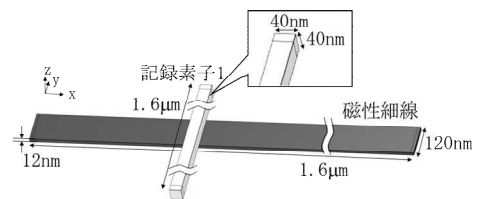


Fig. 1 Simulation model for magnetic nanowire with one recording head.



Fig.2 Simulation results of domain formation in specimen nanowires with (a) recording head 1, and (b) with recording heads 1 & 2 with a separation distance of 100 nm , respectively.



Fig.3 Simulation result of domain formation in specimen nanowire with recording heads 1 & 2 with a separation distance of 40 nm .

有機金属分解法による熱処理の影響と 六方晶フェライト作製条件の探索

工藤 駿、関寺 健人、安川 雪子
(千葉工業大学 電気電子情報工学専攻)

Influence of heat treatments on the formation of hexagonal-structural ferrites through
an metal-organic decomposition method

S. Kudo, K. Sekidera, Y. Yasukawa

(Graduate School of Engineering, Department of Electrical, Electronics and Computer Engineering,
Chiba Institute of Technology)

背景

有機金属分解法(MOD法)とは、原料を含むコート剤の塗布、仮焼、本焼の工程により薄膜を作製する方法である。本法のメリットは真空環境を必要としないため簡単に薄膜を作製でき、また試料の大面积化が可能なのが挙げられる[1]。しかしながら、ガーネット以外のフェライトをMOD法で作製した事例は少なく単一相の六方晶フェライトを作ることは難しい[2]。我々はMOD法を用いて六方晶フェライトの一種である $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ の薄膜作製を目指しており、本研究では本焼時の熱処理方法について検討を行ったので報告する。

実験方法

単結晶 Si 基板上に Ba:Fe=1:12 のコート剤を滴下し、スピコートで成膜した。スピコーターの回転数は初期回転数を 250 rpm で 20 秒、次いで 3000 rpm で 30 秒とした。ホットプレート上で第 1 仮焼を 100 °C で 10 分間、第 2 仮焼を 300 °C から 325 °C で 5 分から 15 分間施した。本焼は 700 °C から 900 °C で 6 分から 300 分間施した。本焼時の熱処理は、昇温、所定温度での保持、降温を炉中で行う「炉中熱処理」、また所定温度の電気炉中に試料を入れ一定時間保持した後に降温する「急熱処理」で比較した。本焼は空気、窒素、窒素後に空気としたそれぞれの雰囲気下で行った[3]。作製した試料は X 線回折法(XRD)を用いて生成相の同定、振動試料型磁力計(VSM)を用いて室温での磁気特性の評価、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて表面形態を観察した。

実験結果

第 2 仮焼を 325 °C で 15 分、本焼を 900 °C で炉中熱処理及び急熱処理で成膜した試料を比較検討した。この時、昇温と降温は何れも 3 時間、900 °C での保持を 1 時間とした。また本焼時の雰囲気は空気である。それぞれの試料の XRD の結果からは単一相の $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ を確認した。Fig.1 に膜面直方向の磁気特性を示す。急熱処理を行った方が、飽和磁化が大きくなった。また何れの試料も $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ の特徴である硬磁性的特性を示した。本焼時の熱処理法が磁気特性に大きく影響を及ぼしている。発表ではコート剤の塗布回数、第 1 仮焼、第 2 仮焼条件の違いによる生成相及び磁気特性の差異についても報告する。

謝辞

本研究の一部は文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業の支援により、東京大学で実施された。

参考文献

- 1) S. Ikehara, K. Wada, T. Kobayashi, S. Goto, T. Yoshida, T. Ishibashi, and T. Nishi, J. Magn. Soc. Jpn., **36**, 169-172 (2012).
- 2) H. Yoshiga, K. Kamishima, N. Hiratsuka, and K. Kakizaki, J. Jpn.Soc.Powder Powder Metallurgy **61**, Supplement, NoS1 (2014).
- 3) Yan Nie, I. Harward, K. Balin, A. Beaubien, and Z. Celinski, J.Appl.Phys **107**, 073903 (2010).

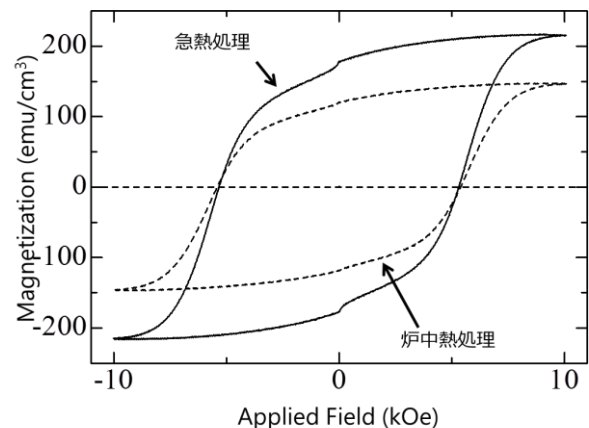


Fig.1 Perpendicular hysteresis loop

磁場微分検出を用いたベクターネットワークアナライザ強磁性共鳴測定装置の開発

田丸慎吾、常木澄人、久保田均、湯浅新治
(産総研 スピントロニクス研究センター)

Vector network analyzer ferromagnetic resonance spectrometer with field differential detection

S. Tamaru, S. Tsunegi, H. Kubota, S. Yuasa
(AIST, Spintronics Research Center)

はじめに

各種高速磁気デバイスの開発において、磁化ダイナミクスの理解は不可欠であり、その為に行われる最も一般的な測定は、強磁性共鳴(FMR)である。FMR 測定には従来電子スピン共鳴(ESR)測定装置が用いられてきた。ESR 測定装置は、マイクロ波をキャビティ共振器に導入し、その中に置かれたサンプルのマイクロ波吸収をモニターする。この方式では励起周波数はキャビティ共振器の共振周波数で決まってしまうため、磁化ダイナミクスの周波数依存性を測る事は出来ない。このため近年では、広帯域で FMR 測定を行う事が出来る、ベクターネットワークアナライザ強磁性共鳴(VNA-FMR)測定装置が使われてきている。VNA-FMR では、平面導波路(CPW)上に磁性サンプルを配置し、CPW にマイクロ波を注入して透過係数(S_{21})を測定しつつバイアス磁場を掃引する。FMR 共振条件が満たされると、磁性体の共振によりマイクロ波が吸収されるので、それを S_{21} の変化として測定する。しかしながら、この方式では FMR 共振に伴う S_{21} 変化が、VNA の S パラメータ測定の感度揺らぎ(トレースノイズ)より小さくなると、信号がトレースノイズに埋もれてしまい測定出来なくなってしまうという問題があった。この問題を解決する為、我々は従来の VNA-FMR に磁場微分検出法を組み合わせ、測定感度の向上を試みた。

装置の概要

図1は本研究で構築した VNA-FMR のブロック図である。本システムでは、従来の VNA-FMR に変調コイルが追加されており、これにより、バイアス磁場に加えて変調磁場をサンプルに印加し、その変調磁場による S_{21} の変化分だけを数値計算により抽出する。図2は従来と本研究で構築された VNA-FMR それぞれで測定された、FeB(1.6 nm)/W(0.1 nm)/FeB(1.1 nm)積層膜の FMR スペクトルの比較である。従来法によって測定された結果は、VNA のトレースノイズによってベースラインが揺らぎ、SN 比が非常に低くなっているのに対し、本研究の VNA-FMR による測定結果は、非常に高い SN 比を示している。これは、VNA のトレースノイズは低い周波数に偏っており、その為長時間に渡る測定では、一連のシーケンスの最初に測ったベースラインノイズの結果が、時間の経過とともに不正確となり、ノイズとして表れてしまうが、変調法ではそのような低周波のトレースノイズが効果的に除去されるためである。本発表では、本方式で構築された VNA-FMR のハードウェア構成、測定シーケンス及びデータ処理方法等について詳細に解説する。

参考文献

- 1) S. Tamaru et. al., Rev. Sci. Instrum, 89, 053901 (2018)

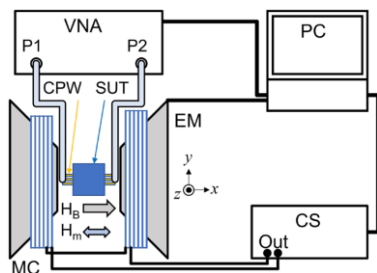


図1,本研究で構築された磁場微分検出 VNA-FMR のブロック図

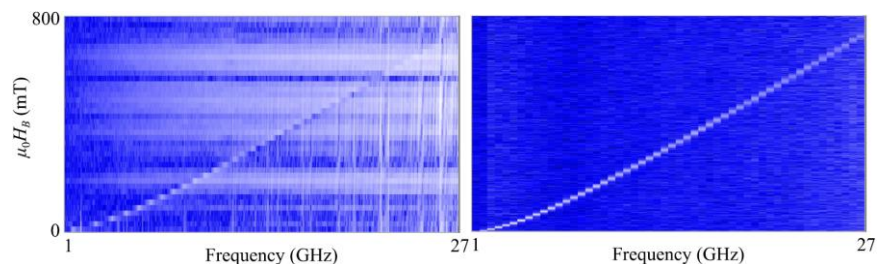


図2,FMR 測定結果の比較。(左)従来の VNA-FMR、(右)本研究で構築された磁場微分検出 VNA-FMR

リニアモータを用いたガソリンエンジン用動弁機構 (電磁界解析を用いた基礎的検討)

佐藤礼直、加藤英晃、成田正敬
(東海大)

Valve mechanism for gasoline engine with linear motor
(Fundamental consideration using electromagnetic field analysis)

Y. Sato, H. Kato, T. Narita
(Tokai Univ.)

はじめに

近年、省エネルギーの観点から自動車用エンジンの高効率化が求められている。高効率化を達成する上で達成すべき項目として、急速燃焼、充填効率の向上、フリクションロス低減があり、様々な検討が行われている。一般的にエンジンの動弁系は従来のカムとバルブスプリングを含めた機構が用いられている。このとき、エンジンに起因する振動の影響で発生する弁ばねの共振はカムシャフトに応じたタイミングとは異なる予期しないバルブの開閉を発生させる原因となる。

これに対し従来技術では、不等ピッチバネを用いて固有振動数を変化させて解消を図っているが、高回転域での共振の発生は高速化を阻む要因となっている。この問題を解決するためカム機構を用いずリニアモータを用いてバルブを開閉するシステムが提案されている^{1,2)}。しかしながら、これらの検討はバルブスプリングのサージ現象を解決することに主眼が置かれており、バルブリフト量、タイミングを任意に変更できる点を積極的に効率向上に用いる検討は行われていない。

そこで当研究グループはエンジンバルブを開閉可能なリニアモータを設計し、任意のバルブリフト量、タイミングによって燃焼効率の向上やポンピングロス低減が実現可能なバルブシステムを提案する。本報告は初期検討としてバルブ駆動用リニアモータについて電磁界解析を行い、温度条件を変更した際の出力特性について検討を行った。

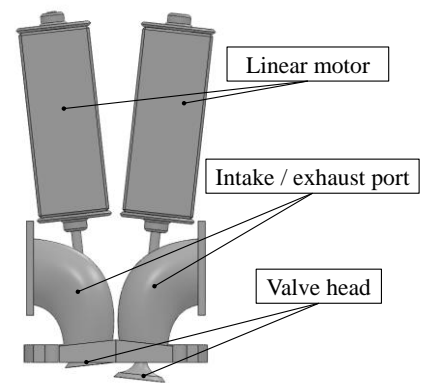


Fig. 1 Electric valve system for gasoline engine

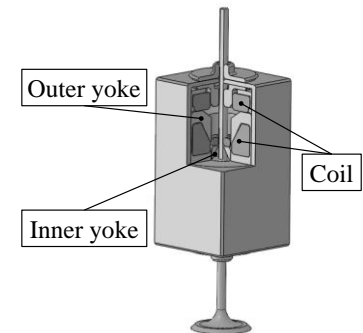


Fig. 2 Analytical model of electric valve

電磁界解析による推力特性に関する検討

本報告では、電磁気バルブエンジン (Fig. 1) のアクチュエータであるリニアモータ (Fig. 2) を対象とし、その設計を行い、磁場解析により推力特性を算出した。本報告で対象とするリニアモータはエンジンの中で燃焼室の直上にあるに設置するため 70~百数十 °C に耐えうる構造としなくてはならない。

Fig. 2 のリニアモータを 3DCAD にて設計し、モータ温度を 70~150 °C の間で変更して解析を行った。電磁石に 20 A の直流電流を印加した際に可動部に発生する推力特性を求めた。

参考文献

- 1) 打田正樹, 竹村昌也, 森田良文, 神藤久, 藪見崇生, 日本 AEM 学会誌, Vol.14, No.4, pp. 394-399, 2006.
- 2) 岡崎昭仁, 長谷川拓也, 根本泰行, 技術史教育学会誌, Vol.16, No. 1, pp29-34, 2014.

ボイスコイルモータを用いた超小型モビリティのアクティブシート (振動制御を考慮したモータ設計に関する基礎的検討)

遠藤文人、池田圭吾、三野輪良祐、加藤英晃、成田正敬
(東海大)

Active seat for ultra-compact mobility with voice coil motor
(Fundamental consideration on design method of motors considering control of vibration)

A. Endo, K. Ikeda, R. Minowa, H. Kato, T. Narita
(Tokai Univ.)

はじめに

近年、観光地や都市部における移動の質を向上させるために超小型モビリティが提案されている。しかしながら、超小型モビリティは簡素な設備であり、振動による乗り心地の劣化が想定される。そこで当研究グループではアクチュエータにボイスコイルモータ (VCM) を使用し、小型な車両にも搭載可能なアクティブシートサスペンションを提案している。これまでに乗り心地向上を目的とした振動制御手法に関して報告してきた¹⁾。しかしながら、実車へ搭載する際には小型かつ軽量の機器とする必要がある。さらに、可能な限り制御効率を向上させ、制御によるエネルギー損失の少ない VCM の設計が求められる。そのため振動制御を想定した効率的な VCM の設計指針を確立する必要があると考えられる。そこで本報告では磁場解析と実際の利用環境を想定した運動シミュレーションを用いて、VCM の電気的特性による制御性能への影響について明らかにした。

解析条件

本報告では、これまでの研究において振動制御に対する有用性を明らかにしてきたアクティブシートサスペンション (Fig. 1) に搭載されているアクチュエータの VCM (Fig. 2) を対象とした。本報告で対象とする VCM は 4 つの永久磁石 (1 つの永久磁石につき残留磁束密度 1.2 T) が SS400 で製作されたヨークに取り付けられている固定部と 2 つのコイルが取り付けられている可動部で構成されている。なお、固定部と可動部のエアギャップは 3 mm とした。

解析ではまず、VCM の電気的特性に大きく影響を及ぼすコイルの導線径をいくつかの条件で変化させ、各条件における VCM の推力特性ならびに電気的特性を明らかにした。さらに、明らかになった VCM の特性を考慮してアクティブシートサスペンションを 1 自由度モデルに置き換え、運動シミュレーションを実施した。運動シミュレーションでは段差を降りた際に車両に加わるような衝撃力を想定した。VCM の各条件において振動の抑制効果と効率を算出し、衝撃力に対して適切な VCM の設計指針について考察した。

参考文献

- 1) 阿部, 新井, 押野谷, 石橋, 日本機械学会年次大会講演会論文集, Vol. 7, No. 02-1, (2002), pp. 175-176.
- 2) 加藤, 長谷川, 押野谷, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 37, No. 3-1, (2013), pp. 95-101.

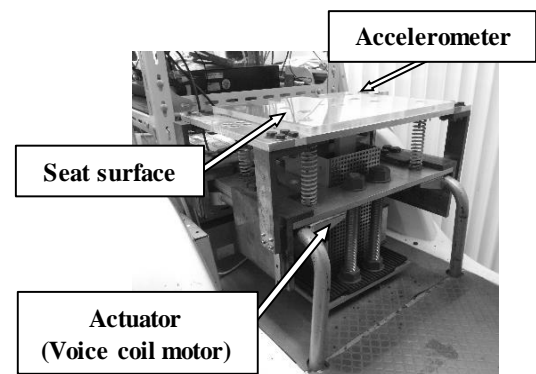


Fig. 1 Active seat suspension

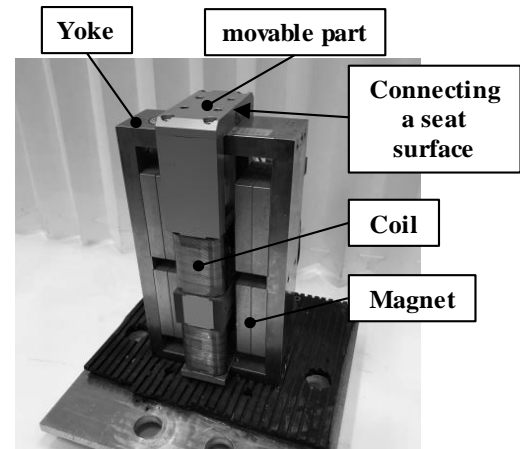


Fig. 2 Voice coil motor

水平方向からの磁場を用いた柔軟鋼板の磁気浮上装置 (金属箔の浮上に関する基礎検討)

小田吉帆、伊藤誉淳、奥野健吾、成田正敬、加藤英晃
(東海大学)

Electromagnetic levitation system for flexible steel plate using magnetic field from horizontal direction
(Fundamental consideration on levitation of metal foil)

Y. Oda, Y. Ito, K. Okuno, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ.)

緒言

鋼板の磁気浮上技術に関する研究が活発に行われており、中でも浮上対象を薄鋼板に注目した検討が行われている¹⁾。著者らは従来の支持方向だけでなく、水平方向に電磁石を設置して位置決め制御を行う手法を提案し、板厚 0.18 mm、0.24 mm の薄鋼板の磁気浮上搬送が可能であることを確認している²⁾。このとき水平方向に設置した電磁石からの磁場によって張力だけではなく鋼板が浮上する支持力も得られることを確認している。そこで著者らは、水平方向にのみ電磁石を設置した磁気浮上システムの提案を行い、より薄い鋼板に対して有効であることを解析的に確認している³⁾。しかしながら、これまで板厚 0.18 mm 以上の、薄鋼板に対する実験的な検討は行われてきたが、それよりも薄い鋼板に対する検討は行われていない。そこで本報告は、著者らが提案をしている水平方向にのみ電磁石を設置した磁気浮上システムを用いて、より柔軟で浮上が困難な金属箔を浮上対象として浮上実験を行い、浮上性能について基礎的な検討を行った。

水平方向にのみ電磁石を設置した磁気浮上装置と金属箔の浮上実験

Fig. 1 に著者らが提案をしている磁気浮上装置の写真を示す。浮上対象は、幅 100 mm、長さ 400 mm、板厚 0.05 mm の金属箔 (SS400) をとした。本装置は 4 つの電磁石ユニットから構成されており、2 つの電磁石ユニットがペアになっており、金属箔を挟み込むように設置されている。1 つの電磁石ユニットは 1 つの電磁石と 1 基のレーザセンサから構成されている。本装置は鋼板エッジ部に対して、電磁石から吸引力を印加し、測定された水平方向変位と電流値をフィードバックして非接触位置決め制御を行う。本装置を用いて金属箔に対する浮上性能を確認するため、浮上実験を行った。電磁石に流す定常電流値は電磁界解析により、浮上可能な 0.8 A とした。金属箔の上部に設置した非接触変位センサにより測定した金属箔の鉛直方向の時刻歴を Fig. 2 に示す。

結言

著者らが提案した水平方向にのみ電磁石を設置した磁気浮上装置を用いて板厚 0.05 mm の金属箔の浮上実験を行った。実験の結果、これまで浮上が困難であった金属箔を浮上させることができた。また、これまでの板厚よりも少ない定常電流で浮上が維持できたことから、本手法がより薄い浮上対象に有効であることを確認した。

参考文献

- 1) 鈴木他, 日本 AEM 学会論文誌, Vol. 25 (2017), No.2, pp. 118-124.
- 2) 木田他, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 1 (2017), No. 1, pp. 76-81.
- 3) T. Narita et. al., Jour. Mag. Soc. Jap., Vol. 41 (2017), No. 1, pp. 14-19.



Fig. 1 Photograph of the electromagnetic levitation system.

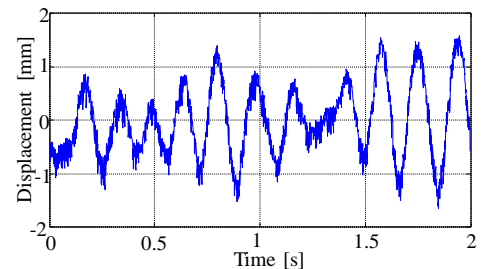


Fig. 2 Time history of the vertical displacement of the steel plate.

リニア誘導モータを用いた宇宙エレベータクライマー (推力特性に関する基礎的検討)

別所飛彦、石原宙、奈良輪祥泰、山口遼、成田正敬、加藤英晃
(東海大学)

Space elevator climber using linear induction motor
(Fundamental consideration on thrust characteristics)

T. Bessho, S. Ishihara, Y. Narawa, R. Yamaguti, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ.)

はじめに

近年、スペースシャトルやロケットに代わる新たな宇宙輸送手段として宇宙エレベータに関する研究が行われてきている¹⁾。宇宙エレベータは現行のロケット等による輸送手段に比べて爆発事故や墜落等の危険性を大幅に低減できることに加え、低コストでの輸送が可能となり、優れた輸送システムと言える。現状の宇宙エレベータ昇降機(クライマー)は、Fig. 1のようにテザーと呼ばれるケーブルをローラ同士で挟み込むことで生じる摩擦力を利用して昇降する仕組みとなっている²⁾。しかし、この摩擦力を利用した手法の場合、摩擦によるテザーの摩耗やローラの劣化などの問題が発生し、定期的なメンテナンスが必要となり、コスト増加などの問題も浮上してしまう。

そこで当研究グループは、リニア誘導モータ (Linear Induction Motor 以下 LIM) を用いた非接触昇降機を提案する。本報告は、テザーを非磁性体のリアクションプレート (以下 RP) を使用するとし、実用化されている LIM を参考に設計したクライマーが、宇宙エレベータ用クライマーとして昇降可能であるか電磁界解析ソフトウェア JMAG によって検討を行った。

解析に使用するモデル

本研究では JMAG による電磁界解析を主として行うため、JMAG 上で解析可能な LIM のモデルを作成した。作成した解析用モデルの一部分を拡大したものを Fig. 2 に示す。解析モデルは、実際に利用されている LIM を参考に作成した。また LIM の推力特性およびクライマーとしての有効性を確認するため、コイルエンドを考慮する必要がない 2 次元モデルとして解析を行っている。Fig. 2 に示したモデルは 2 段組みのスロットとなっており、1 段のスロット数は 79、2 段のスロット合計は 158 である。また、コア内部には永久磁石を挟んで 9 つのスロットに分かれて構成されており、そのうちコイルが入るスロットは 1 段あたり 72 であり、7 か所の空洞がある。電流源は三相電流源を使用し、LIM と RP の間隔、LIM に流れる電流 I を変更して電磁界解析を行った結果、宇宙エレベータとして有効な推力特性が得られた。

参考文献

- 1) 山極, 加藤, 三輪, 松井, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, (2012), 1A2-L01(1)- 1A2-L01(4).
- 2) 伊藤, 津国, 池内, 西川, 江上, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, (2011), 1A2-L01(1)- 1A2-L01(2).

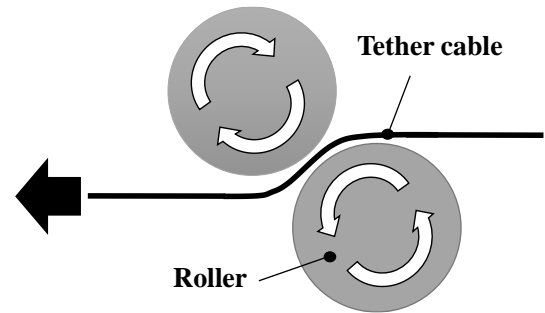


Fig. 1 Structure of the current climber.

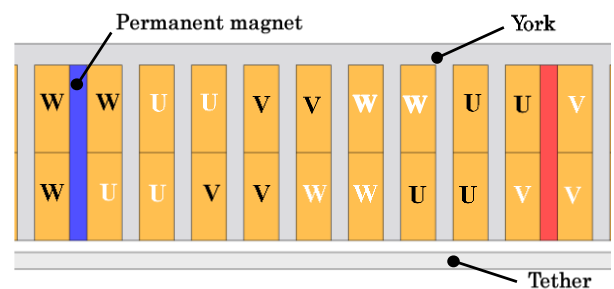


Fig. 2 Analytical model of proposed LIM installment climber.

柔軟鋼板の湾曲浮上制御 (外乱状況下での浮上性能に関する実験的検討)

小川和輝、多田誠、成田正敬、加藤英晃
(東海大学)

Bending levitation control for flexible steel plate
(Experimental consideration on levitation performance under disturbance)

K. Ogawa, M. Tada, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ.)

はじめに

電磁石による非接触搬送を行うため、磁気浮上技術の検討が盛んにおこなわれている¹⁾。当研究グループでは、過去に磁気浮上による非接触搬送の実現性を確認している²⁾。またさらに薄い鋼板を対象とする場合には、鋼板を塑性変形しない範囲で曲げた状態で浮上させる湾曲磁気浮上を考案した³⁾。本研究では実際の使用環境を想定し、電磁石ユニットに外乱が入力された状態における浮上性能について検討した。

実験

Fig. 1 に磁気浮上制御システムの概略図を示す。浮上対象は長方形亜鉛めっき鋼板 (長さ $a = 800$ mm、幅 $b = 600$ mm、厚さ $h = 0.30$ mm) を使用している。長方形鋼板を5箇所の電磁石により非接触支持するために、鋼板の変位を5個の渦電流式非接触変位センサにより検出する。5個の電磁石のうち周囲の4個は傾けることができる機構になっている。また、中央の電磁石は垂直方向に可動できる。このように5個の電磁石を移動、傾斜させることによって様々な湾曲角度で鋼板を磁気浮上させることができる。

なお、電磁石ユニットを設置している3本のフレームの下に設置した加振器 (Fig. 2) によって、外乱を電磁石本体に入力できる構成になっている。Fig. 3 に外乱入力時のフレーム変位時刻歴とスペクトルを示す。このように電磁石ユニットをランダムノイズによって加振した状態で浮上実験を行い浮上性能の向上を確認した。

参考文献

- 1) T.Mizuno et al., *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 3, No. 2 (2016) 15-00687
- 2) 押野谷他, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 62, No. 95, (1996), pp. 127-133.
- 3) 丸森他, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823, (2015), 14-00471.

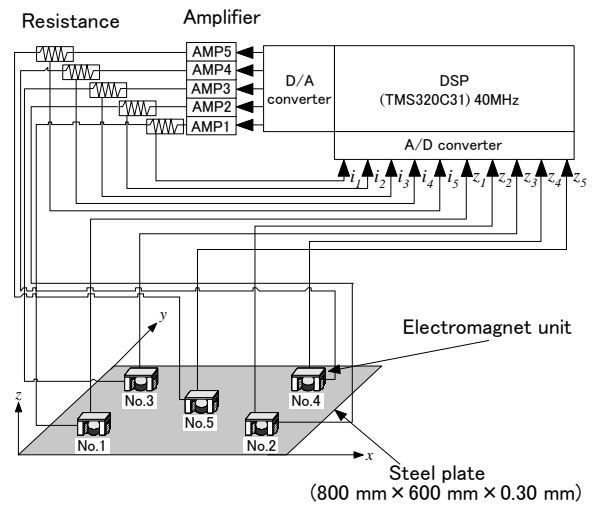


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system.



Fig. 2 Photograph of vibrator.

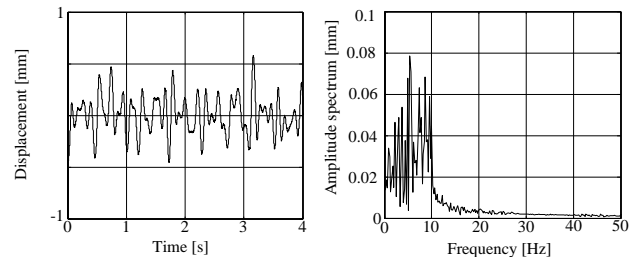


Fig. 3 Time history of displacement and amplitude spectrums of vibrating frames by the random disturbance.

液冷システム用磁気駆動マイクロポンプの特性改善

占部諒、山田大生、本田崇
(九工大)

Performance improvement of magnetically driven micro-pumps for liquid cooling system

R. Urabe, T. Honda
(Kyushu Inst. of Tech.)

はじめに

本研究では、ノート PC 等に搭載する小型液冷システムへの応用を目指し、弾性板の揺動を利用した磁気駆動マイクロポンプの開発を進めている。本報告では、ポンプ内部の断面形状を従来の円形から矩形に変更した結果、大幅に特性を改善でき、液冷システムへ組み込んだ際の冷却性能も良好だったので報告する。

マイクロポンプの試作と基礎特性

Fig.1 にプロトタイプ構成を示す。揺動機構は、厚さ方向に着磁された2個の円盤状 NdFeB 磁石($\phi 4\text{mm} \times 1\text{mm}$)の間に、NdFeB 微小磁石($\phi 1\text{mm} \times 0.5\text{mm}$)を2個重ねたものを前後2ヶ所に配置し、その一方の微小磁石間に弾性板として $50\mu\text{m}$ 厚のポリイミド(PI)フィルムを挟み込んで構成される。PIフィルムは長方形で、幅 4mm 、磁石端から先端までの距離を 6mm とした。本機構を、回転軸を介して流路内に取り付けた。流路の断面形状は高さ 5mm の矩形であるが、磁石周囲の幅は磁石の回転を妨げないよう広く、弾性板が揺動する流路の幅を 2.5mm とした。但し、図のように磁石側にテーパを設けている。

Fig.2 に動作原理を示す。ポンプ長手方向に交流磁界を印加することで、磁石は磁気トルクによって回転軸を中心に回転振動する。それに伴い弾性板が揺動し液体を送り出すことで、ポンプとして機能する。

ポンプの評価は室温で行い、作動流体には温度上昇を考慮し、濃度20%の不凍液を使用した。評価項目はポンプ単体と複数個を直列接続した場合について 50Oe (4kA/m) 印加時における流量の周波数特性を評価した。まずポンプ単体で評価した結果、従来の円形断面(内径 4mm)の無負荷流量の最大値が 124.6ml/min に対し、矩形断面では 168.1ml/min と35%の増加を達成した。最大流量はポンプを連結することで増加し、2連結時において 242ml/min 、3連結時において 276ml/min まで増加した。矩形断面の2連結の流量は、円形断面の3連結(液冷システムを駆動できる最小連結数)を上回った。この結果を基に、矩形断面の連結個数は2つで対応できると判断し、プロトタイプの不要部を削り落とすことで小型化を行った。Fig.3 に小型化後のポンプと駆動用ソレノイドコイル(8mm 角)の外観の写真を示す。

冷却特性の評価

液冷システムは、CPU を模したヒーターに液冷ジャケットを固定し、冷却液をポンプで循環させることで、その熱をモニターの背面(Al板, $30\text{cm} \times 40\text{cm}$)で放出する構成になっている。室温 25°C の環境下で、 50W クラスの CPU を想定した状態で冷却を行った結果、ヒーター表面温度は 51.4°C と、目標値 55°C を大きく下回り、十分な冷却性能を確認した。駆動コイルの消費電力は 1.2W であった。

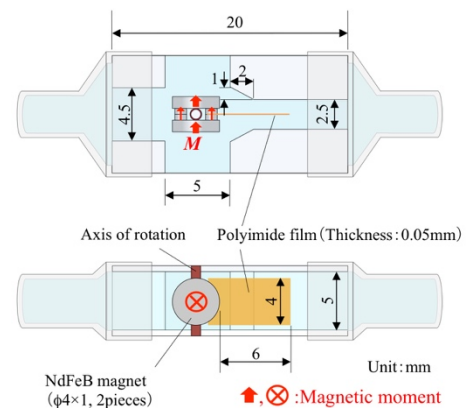


Fig.1 Structure of a micro pump.

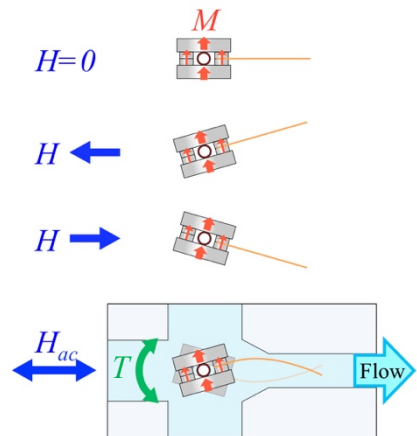


Fig.2 Actuation principle.

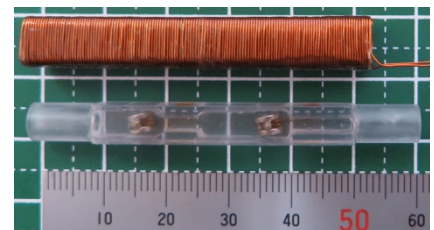


Fig.3 Photograph of a drive coil and two series pumps.

カプセル型医療機器に内蔵可能な磁気駆動生検機構

松井利樹、本田崇
(九工大)

Magnetically driven biopsy mechanisms incorporated into capsule-type medical device

T. Matsui, T. Honda
(Kyushu Inst. of Tech.)

はじめに

カプセル内視鏡は小腸検査に広く用いられるようになったが、その機能は現状では観察に限定される。本研究では、診断もできる次世代カプセル内視鏡への搭載を目指し、外部磁界でワイヤレス駆動可能な3種類(タイプA,B,C)の生検機構を考案した。本報ではそれらの試作と評価結果について報告する。

素子構成と動作原理

生検機構を組み込むカプセル管体の寸法は、直径11mm、長さ31mmとした。生検機構はいずれも永久磁石を固定したボルトとナットを組み合わせた機構で構成し、回転磁界から受ける磁気トルクで動作する。以下にそれぞれの概要を示す。

タイプ A

Fig.1 にタイプ A の基本構成と動作原理を示す。ボルト(M2)の一端に円筒刃($\phi 2\text{mm}$)、他端にNdFeB磁石($\phi 4\text{mm} \times 2\text{mm}$ 、径方向着磁)を取り付けたもので、カプセルの長軸方向に対して垂直に固定したナットに挿入し構成される。x-y平面に回転磁界を印加すると、磁石が磁気トルクを受け、円筒刃が回転しながらカプセル側面から突出する。円筒刃が生体組織を切り取った後、逆方向の回転磁界を印加することで、組織の回収を行う。

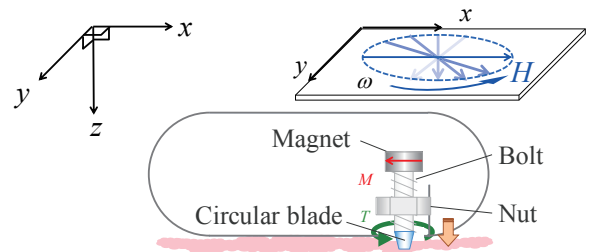


Fig.1 Actuation behavior of Type A

タイプ B

タイプ B は、2つの円筒刃(可動刃と固定刃、 $\phi 8\text{mm}$)でカプセル側孔内に食い込んだ組織を挟み切る機構を採用した。Fig.2 に基本構成と動作原理を示す。カプセル中心軸に配置したボルト(M2)にNdFeB磁石($\phi 8\text{mm} \times 2\text{mm}$ 、径方向着磁)を固定し、スライダとして可動刃を取り付けたナット(M2)を挿入し構成する。y-z平面に回転磁界を印加すると、ボルトが回転しナットがカプセル長軸方向に直動することで2つの円筒刃間の組織を挟み切除する。

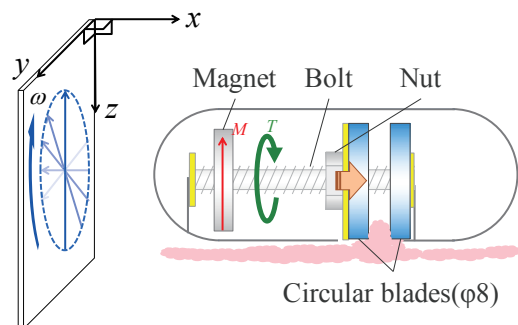


Fig.2 Actuation behavior of Type B

タイプ C

Fig.3 にタイプ C の構造と動作原理を示す。2つの鉗子カップの開閉で組織を切り取る機構を採用した。構造は、タイプ B のスライダに対し可動刃の代わりに市販の鉗子の芯と圧縮バネを組み合わせた機構を取り付けている。動作は、4段階で行われる。まず y-z 平面に回転磁界を印加することで、鉗子を筐体前方に突出させる。続いて、さらに磁界を印加することでバネを圧縮しながら芯を押し込み鉗子が開く。ここで y-z 平面に逆方向の回転磁界を印加すると、バネの弾性力で中心の芯が引き戻され鉗子が閉じ組織を採取する。その後、更に磁界を印加することで、鉗子を閉じた状態を保持したまま鉗子を筐体内に格納する。

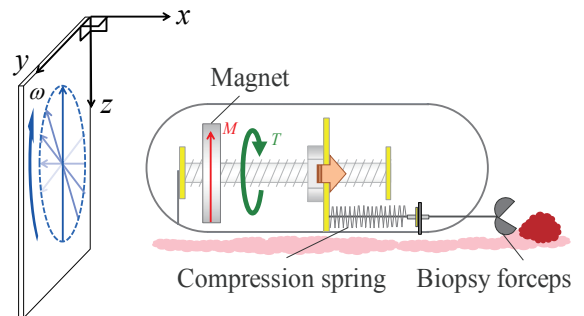


Fig.3 Actuation behavior of Type C

カプセル型医療機器のための磁気駆動薬物放出機構の開発

富永 洋平、本田 崇
(九州工業大学)

Development of magnetically driven drug release mechanism for capsule medical device

Y. Tominaga, T. Honda
(Kyushu Inst. of Tech.)

はじめに

カプセル内視鏡は、被検者が自ら飲み込むだけで消化管内をワイヤレスで観察できる錠剤型の小型内視鏡であり、国内外で広く臨床に供せられるようになった。しかし、その機能は観察のみであり機能面で大きく劣る。そこで、本研究では外部磁界を用いたワイヤレス駆動方式に着目し、消化管内の病変部位に直接薬物を放出する機構を提案し、その有用性を確認したので報告する。

素子構成と動作原理

本研究では、薬物放出機構として蛇腹タンク型とバルーンタンク型の2種類の薬物投与方法を考案した。両機構とも永久磁石及びボルトとナットをアクチュエータとして採用しており、体外から回転磁界を印加することでワイヤレス駆動する。

はじめに蛇腹タンク型について述べる。Fig.1 に素子構成を示す。外径 11mm、長さ 31mm のカプセル管体内部の中心軸に、両側をブッシュで回転できるように支えたボルト(M2)を設置し、直径方向に磁化された円盤状の NdFeB 磁石($\phi 8\text{mm} \times 2\text{mm}$)を取り付けた。スライダとしてナット(M2)を挿入している。さらに、ゴム製の蛇腹タンク(外径 9mm、内径 4mm、容量 0.14mL)にシリコンチューブ(内径 1.0mm)を取り付けており、ナットがタンクを押すことでカプセル先端から薬物を放出することができる。Fig.2 に動作原理を示す。回転磁界をカプセルの長軸方向に対し垂直な面(同図では xz 平面)に印加することで駆動する。磁石の磁気トルクによってボルトが回転し、送りネジの原理でナットが直動することによって薬物を蛇腹タンクから押し出す。薬物放出後は逆向きの回転磁界を印加し、ボルトを逆回転させることでアクチュエータを初期位置まで戻す。小腸内を模した環境下で、磁界強度 150Oe、周波数 4Hz の回転磁界を印加で薬物の放出を確認した。

次にバルーンタンク型について述べる。Fig.3 に素子構成を示す。外径 11mm、長さ 26mm のカプセル管体内部の直径方向にナット(M2)を固定し、直径方向に磁化された円盤状の NdFeB 磁石($\phi 8\text{mm} \times 2\text{mm}$)を取り付けたボルト(M2)を挿入することでアクチュエータを構成する。バルーンタンクはシリコンゴム製で容量が 0.8mL と蛇腹タンク型よりも 5 倍程度多い。タンクから伸びる放出用シリコンチューブは、途中でボルト先端が圧迫しせき止めている。Fig.4 に動作原理を示す。回転磁界をボルトに対し垂直な面(同図では xy 平面)に印加すると、永久磁石及びボルトが回転しながら z 軸方向に動く。その結果、流路が開放され薬物が放出される。また、放出量はボルトの回転数により制御することができる。磁界強度 150Oe、周波数 0.5Hz の回転磁界を印加し、放出を確認した。

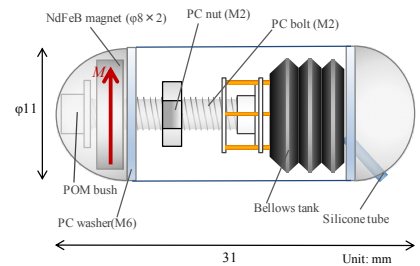


Fig.1 Configuration of the capsule.
(Bellows tank type)

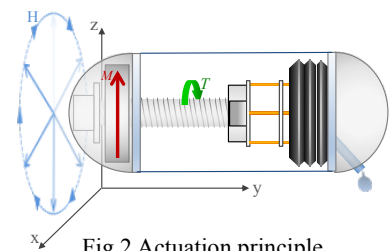


Fig.2 Actuation principle.
(Bellows tank type)

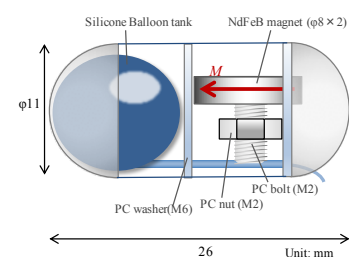


Fig.3 Configuration of the capsule.
(Silicone balloon tank type)

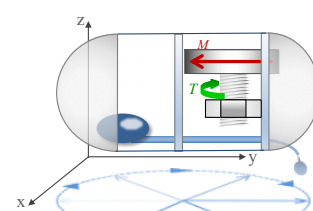


Fig.4 Actuation principle.
(Silicone balloon tank type)

FeSiB フリー層の磁化方向変調型 GMR 歪みセンサの検討

安田 賢汰, 橋本 侑也, 加藤 剛志, 大島 大輝, 岩田 聡
名古屋大学

GMR Magnetic Strain Sensor using modulation of FeSiB free-layer magnetization direction

K. Yasuda, Y. Hashimoto, T. Kato, D. Oshima, S. Iwata
Nagoya University

はじめに

GMR 素子は 2 端子の抵抗素子として扱うことができるため、様々な磁気センサとしての利用が試みられている。スピバルブ構造を持つ GMR 素子において、磁化自由層の磁化方向を磁歪の逆効果によって変化させると、歪みセンサとして利用することができる。我々は外乱磁界に強く、高感度な GMR 歪みセンサとして、フリー層の磁化方向を交流磁界で変調する方式を検討してきた²⁾。これまでの報告では、変調用の交流磁界をヘルムホルツコイルによって発生させていたが、本研究では GMR 素子上に電流磁界発生用の Al 導体パターンを微細加工で形成し、Al 導体に交流電流を流すことで GMR 素子に交流磁界を加えてフリー層の磁化方向を変調する³⁾GMR 歪みセンサを作製し、歪みの検出を行ったので報告する。

実験方法

超高真空スパッタ装置により直流磁界中で、Ta (2) / Mn₈₀Ir₂₀ (10) / Co₉₀Fe₁₀ (3) / Cu (2.2) / (Co₉₀Fe₁₀)₉₂B₈ (1.5) / Fe₇₂Si₁₄B₁₄ (20) / Ta (5) / sub. の GMR 素子を作製した。カッコ内の数値は膜厚 (nm) で、sub. は、基盤として用いた 0.1 mm 厚のカバーガラスを示している。GMR 素子はフォトリソグラフィにより幅 30 μm、長さ 200 μm の細線状に加工し、その直上に絶縁層 Al₂O₃ (200 nm) を介して Al 導体を加工した。直流磁界 $H_{DC} = 10 \sim 50$ Oe を加えることにより、FeSiB フリー層の磁化を困難軸方向に回転させた。Al 導体に交流電流 I_{AC} を流すことで、アンペールの法則により実効値 0.6 Oe、1 kHz の交流磁界 H_{AC} を容易軸方向に印加し、フリー層磁化を振動させた (Fig.1)。この振動に伴い素子の抵抗値が変化して 1 kHz の信号電圧が現れる。GMR 素子はブリッジ回路に組み込み、ブリッジバランスの崩れを計装アンプによって増幅したものを出力信号電圧 V_{out} とした。GMR 素子に歪みを印加すると、フリー層に歪みによる磁気異方性が誘導され、フリー層磁化の振動振幅が変化する。なお、歪みは困難軸方向に加えた。

実験結果

H_{DC} が 10 と 20 Oe の場合には、歪み ϵ に対して V_{out} はピークを示している。これは、FeSiB 層の実効異方性磁界が、 H_{DC} と歪み誘導異方性によって、ちょうど打ち消されたときに H_{AC} による磁化方向の振動が大きくなり、GMR 素子の 1 kHz の信号が極大を取るためである。ピーク位置は、 H_{DC} を大きくすると負の歪み方向にシフトしているが、これは、Fe₇₂Si₁₄B₁₄ が正の磁歪定数 ($\lambda = 3.0 \times 10^{-5}$) をもっているため、負の歪みを加えることで、FeSiB 層の容易軸方向に異方性誘導されるためである。この直流磁界 H_{DC} をパラメータとした $V_{out} - \epsilon$ の特性は、ヘルムホルツコイルを使用したこれまでの報告とほぼ同じ傾向を示しており、Al 導体を用いることでマイクロメータサイズの歪みセンサが実現できる可能性が示された。

参考文献

- 1) S. Dokupil et al., J. Magn. Magn. Mat., **290-291**, 795 (2005).
- 2) Y. Hashimoto et al., J. Appl. Phys., **123**, 113903 (2018).
- 3) G. A. Wang, et al., J. Phys. D: Appl. Phys., **44**, 235003 (2011).

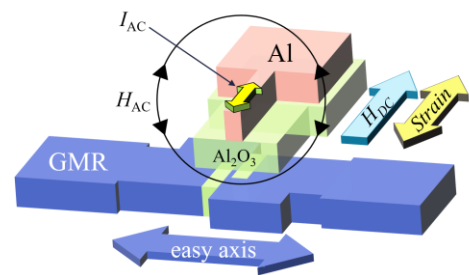


Fig.1 AC magnetic field H_{AC} application method

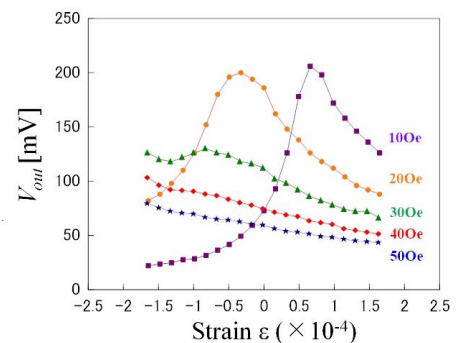


Fig.2 Experimental output voltage V_{out} as a function of the applied strain ϵ

大きな垂直磁気異方性を有する Co-SiO₂ ナノグラニューラー膜の 10GHz 帯高周波軟磁気特性

青木英恵*、武田茂**、大沼繁弘***、増本博*
(*東北大、**キーコム、***電磁研)

10-GHz soft magnetic property of Co-SiO₂ nano-granular film with large perpendicular magnetic anisotropy
Hanae Kijima-Aoki*, Shigeru Takeda**, Shigehiro Ohnuma***, and Hiroshi Masumoto*
(*Tohoku Univ., **KEYCOM, ***DENJIKEN)

はじめに

近年、高周波帯で駆動する小型電子デバイスの発展にともない、10GHz 帯で大きな透磁率、低損失を併せ持つ軟磁性薄膜材料が望まれている。直径数 nm の磁性ナノ粒子が誘電体マトリクス中に分散した構造を有するナノグラニューラー軟磁性膜は、均一分散した磁性ナノ粒子に由来する高い飽和磁化(M_s)、低保磁力(H_c)、ならびにマトリクスに由来する高電気抵抗(ρ)が特長であり、数 100M-数 GHz 帯で優れた軟磁気特性が報告されてきた。これらの膜の GHz 高周波化は、膜に大きな面内一軸磁気異方性を付与することによって実現する。一方で、筆者らは、膜面垂直方向に磁気異方性を有する、すなわち、膜面内方向に磁氣的等方性を有する GHz 帯軟磁性ナノグラニューラー膜を報告してきた¹⁾。面内全方向に使用できる特長があるが、異方性磁界が小さく 2-3 GHz 帯の磁気共鳴周波数以上で透磁率が減少した。著者らは最近、電気抵抗が高く Co と固溶すると異方性の高い hcp 結晶を生じる SiO₂ をマトリクスに選択し、大きな垂直異方性磁界(~4100 Oe)を有する Co-SiO₂ 膜の作製に成功した²⁾。本報告では、Co-SiO₂ ナノグラニューラー膜の微細構造、磁区構造、従来のマイクロストリップライン(MSL)法に加え、新規な短絡同軸法で測定した高周波軟磁気(μ - f)特性の結果を報告する。

実験方法

SiO₂ 円板と Co チップをターゲットとして、石英ガラス基板(0.5mm)上に Co-SiO₂ ナノグラニューラー膜(1.4 μ m \pm 0.1 μ m)をスパッタ成膜した。膜の電気比抵抗は 4 端子法、結晶構造・組織は TEM、静磁化曲線は VSM、磁区構造は MFM で測定した。 μ - f 特性は MSL 法³⁾および短絡同軸法で測定した。

結果および考察

42-56 at.%Co と組成を変化させた Co-SiO₂ 膜を作製した。膜の電気比抵抗は Co の増加とともに 2.4×10^6 から $4.2 \times 10^4 \mu\Omega\text{cm}$ へ減少したが、これまでに報告されているアモルファス軟磁性膜の 100 倍程度と大きい。Co の増加とともに、膜の飽和磁化($4\pi M_s$)および面内の飽和磁界(H_s)は、それぞれ 7.2 から 10.5 kG、1000 から 4000Oe へ増加傾向を示した。 H_s は同じ成膜条件の試料で 1000Oe 程度の分散があり、これは成膜時の冷却不十分による熱の影響が考えられる。本報告では、最も大きな $H_s = 4100$ Oe が得られた Co₅₂(SiO₂)₄₈ 膜の結果を紹介する。TEM による組織観察の結果から、膜は、直径 3-5nm、長さ 7-8nm の楕円形 Co 粒子が SiO₂ マトリクス中に分散した形態を示し、回折線から Co は hcp 構造で、膜面に対して垂直に c 軸配向していることが分かった。磁区観察の結果、膜は表面に磁区幅が 100nm 以下の微細な迷路状磁区が観察された。膜垂直方向の反磁界を減少させるために、垂直方向に互い違いに向く細かい磁区同士で閉磁路を形成していると考えられる。膜の磁化曲線は面内・面直ともに直線的なヒステリシスを示し、 H_s はそれぞれ 4100 および 8600 Oe であった。面直方向の磁化曲線に磁化(M)を用いた薄膜の反磁界補正($H_{\text{eff}} = H - N4\pi M$, N:反磁界係数)を行うと、 H_s はほぼゼロであり垂直方向が磁化容易軸であることが分かった。膜は面内全方向に同じ透磁率(μ)の周波数依存性: 5 GHz 以下で $\mu = 4$, $\mu'' = 0$, $f_r = 13$ GHz を示した。NiZn フェライトなどの結晶材料と比較すると、2GHz 以上の高周波帯における透磁率は 1.5-2 倍大きく、薄膜インダクタなどの応用が期待される。

参考文献

- 1) H.Kijima et al., IEEE. Trans. Magn., 47 (2011) 3928.
- 2) H. K. Aoki et al., IEEE. Magn. Lett., (2018) in press.
- 3) S.Takeda et al., J. Magn. Magn. Mater., 449 (2018) 530.

マイクロレンズアレイを用いて 磁気光学媒体に書き込まれたホログラムによる3次元像の再生

木村陽太、後藤太一*、中村雄一、Lim Pang Boey、内田裕久、井上光輝
(豊橋技術科学大学、*JST さきがけ)

Reconstruction of 3D image using magneto-optic hologram written by micro-lens array
Y. Kimura, T. Goto, Y. Nakamura, P. B. Lim, H. Uchida, M. Inoue
(Toyohashi University of Technology, *JST PREST)

はじめに

立体表示の一手法であるホログラフィは物体光と同様の波面状態を再現するため、眼球の運動、焦点調節などの視覚の生理的要因に負担が無く、裸眼で観ることのできる3次元像を表示することができる¹⁾。我々は広視野角ホログラフィックディスプレイの実現を目指し、熱磁気記録法によって垂直磁化膜上に磁気ピクセルを形成する磁気光学3次元ディスプレイの開発を行ってきた^{2,3)}。しかし、1 μm のピクセルを用いるホログラムの記録では記録時間の短縮が3Dディスプレイの実用化への大きな課題であった。先行研究ではホログラムをページデータとして記録することで記録時間の短縮を図ってきたが、走査距離がホログラム全域と大きくなる点が問題であった⁴⁾。そこで我々はMicro-Lens-Array (MLA)と呼ばれる微小レンズが矩形配列された素子を用いて多数のピクセルを同時に書き込みつつ走査距離を短縮することで課題の解決を試みてきた。本稿では MLA を用いた光学系によるホログラムの記録と3次元像の再生を目的とする。

実験方法および装置

本研究では、Digital Micro mirror Device (DMD)によって空間上で変調された光を MLA に通し、磁性薄膜上に集光することで、熱磁気記録を行う2次元配列書き込み用の光学系を開発した。1 μm ほどに集光した配列状のデータをピエゾステージの走査距離が100 μm となるような書き込みを行う。再生は、ホログラムを記録した磁性薄膜に対して、0次光の透過強度が小さくなるように、偏光子および $\lambda/4$ 板を通過した楕円偏光を入射し、磁性薄膜にて反射させた後、検光子で変調成分を取り出し、カメラで撮影した。

計算機ホログラムによって立方体のホログラムを計算した。記録・再生に用いる磁性薄膜にはイオンビームスパッタ法によって成膜した SiN(30 nm)/*a*-TbFe(50 nm)/SiN(20 nm)/ガラス基板の構造を採用した。ネオジム磁石を用いてこの光磁気書き込み媒体を一様に磁化させた後、この書き込み用光学系を用いて、立方体のホログラムの熱磁気記録を行った。

3D 像の再生

光磁気記録媒体の磁気光学効果のカー回転角は1度で、高い角型性を持つことが分かった。本研究で開発した書き込み光学系では記録に必要な走査距離が大幅に短縮され、従来の方法では15 min程度必要であったホログラムの記録時間を5 secまで短くすることができた。再生された立方体の再生像を Fig. 1 に示す。一辺が20個の輝点で構成される立方体を左右それぞれ6度の範囲まで観測することができた。したがって MLA を用いた2次元配列記録光学系により、3次元像の再生を高速に行うことができた。今後は本記録光学系にて回折格子の記録を行うことで記録精度および視野角の評価を行う。

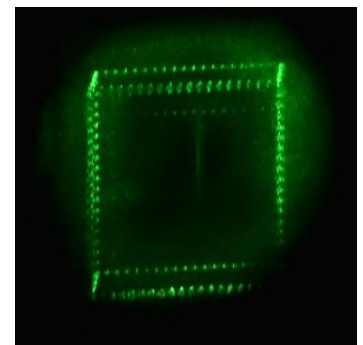


Fig. 1. A 3D cubic frame image reconstructed using a magneto-optic medium. Hologram pattern was written by focused laser using micro-lens-array.

参考文献

- 1) V. M. Bove, *Proc. IEEE* **100**, 918 (2012).
- 2) H. Takagi, et al., *Opt. Lett.* **39**, 3344 (2014).
- 3) K. Nakamura, et al., *Appl. Phys. Lett.* **108**, 022404 (2016).
- 4) H. Takagi, et al., *Sensor and Materials*.**27**, 1003(2015).

磁気表面プラズモン効果を用いたファイバ型磁気センサの薄膜構造設計

中山 惇、外山隆太、芦澤好人、中川活二
(日本大学)

Design of film structure for a fiber type magnetic sensor using magneto-plasmonic effect
A. Nakayama, R. Sotoyama, Y. Ashizawa, and K. Nakagawa
(Nihon Univ.)

はじめに

表面プラズモン(SP)の励起条件が磁性体の磁化方向により変化する磁気表面プラズモン効果が報告¹⁻³⁾され、注目を集めている。我々はこれまで Ag-Co 単層薄膜²⁾及び Au/フェライト二層薄膜³⁾などにおいて、磁気表面プラズモン効果を報告している。この磁気表面プラズモン効果を用いた新規磁気センサの実現を目指している。しかし、ファイバ型センサを創る上では、SPが励起する金属薄膜への光入射角度と、光ファイバ中の伝搬角度との不一致が問題になる。そこで、表面誘電率の変化を検出するプラズモンセンサの特性を活かし、SP励起材料上に誘電体を積層することにより、プラズモン共鳴角の高角度化を行った。本報告では実際に光ファイバとマッチング可能な薄膜構造の設計を検討した。

表面プラズモン励起角の高角度化

通常プリズムを用いる全反射減衰法の実験においては、およそ 45°近傍に表面プラズモンの励起に起因する反射率の低下が観測される。この角度は SP の励起を示す。今後共鳴角と呼ぶ。一方、シングルモード (SM) ファイバを用いる場合には、入射角はおよそ 75°以上になる。そこで、まず SP が励起する共鳴角の高角度化を検討した。

ファイバのコアに金属層と誘電体層を形成することを想定し、コア SiO₂/Ag (45 nm) /誘電体 (h_3) /空気の 4 層からなる多層膜における反射係数を算出した。入射光の波長は 700 nm とし、表層の誘電体を SiO₂ とし、誘電体厚 h_3 による入射角の高角度化を検討した。 h_3 は 0 - 170 nm まで変化した。 h_3 に対する反射率の入射角度依存性を Fig. 1 に、共鳴角の誘電体層厚の依存性 Fig. 2 示す。 h_3 が厚くなるにつれて共鳴角が高角度側にシフトした。

磁気表面プラズモン効果のための表層誘電磁性体の最適化

磁気表面プラズモン効果を発現するためには、誘電磁性材料を表層に用いることが有効である。誘電磁性材料の選定指針を導出するために、ファイバ中を伝搬する入射角で SP が励起する誘電率と膜厚の条件を検討した。

Ag 薄膜上に積層する誘電体の膜厚と屈折率に対して、表面プラズモンの共鳴角を Fig. 3 に濃淡で示す。特に入射角 75°以上で共鳴する条件を○で示した。これにより、薄膜上の誘電体の屈折率及び膜厚の調整によりファイバ中の伝搬角において表面プラズモンの励起が可能であることが示された。

謝辞

本研究は文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(平成 25～29 年)の研究助成を受けて行った。

参考文献

- 1) J. B. González-Díaz et al., *Phys. Rev. B*, **76**, 153402 (2007).
- 2) T. Tachikawa et al., *J. Magn. Soc. Jpn.*, **38**, 135 (2014).
- 3) K. Narushima et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 07MC05 (2016).
- 4) R. Slavík et al., *Sensors and Actuators B*, **51**, 311(1995).

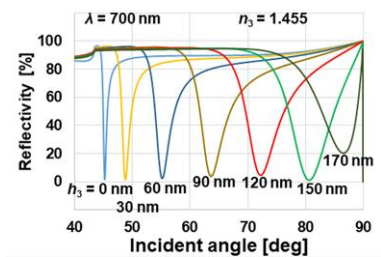


Fig. 1 Incident angle dependence of reflectivity as a function of thickness h_3 of a SiO₂ layer.

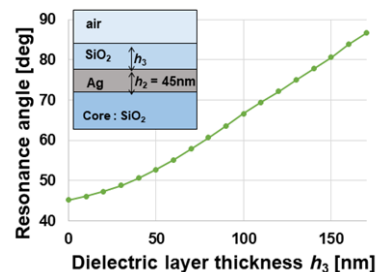


Fig. 2 Resonance angle as a function of dielectric layer thickness h_3 .

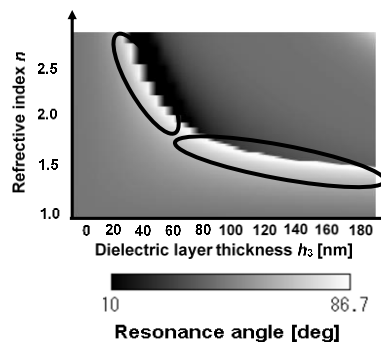


Fig. 3 SPP resonance angle map for ranges of index of refraction n and thickness h_3 of a dielectric matter.