厚膜磁石の作製と応用

中野 正基^a, 進士 忠彦^b, 板倉 賢^c, 山下 昂洋^a, 柳井 武志^a, 福永 博俊^a

^a 長崎大学 大学院工学研究科 (〒 852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

^b 東京工業大学 科学技術創成研究院 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

^c 九州大学 大学院総合理工学研究院 (〒 816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)

Preparation of Thick-Film Magnets and Their Applications

Masaki NAKANO^a, Tadahiko SHINSHI^b, Masaru ITAKURA^c, Akihiro YAMASHITA^a,
Takeshi YANAI^a and Hirotooshi FUKUNAGA^a

^a Graduate School of Engineering, Nagasaki University (Bunkyo-machi 1-14, Nagasaki-shi, Nagasaki 852-8521)

^b Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology (Nagatsuta-cho 4259, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 226-8503)

^c Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University (Kasuga-Koen 6-1, Kasuga-shi, Fukuoka 816-8580)

Keywords : Permanent Magnets, Thick-Film Magnets, PLD (Pulsed Laser Deposition), Sputtering

1. はじめに

「永久磁石膜(ハード磁性膜)」が最も実用化されている例は、「磁気記録媒体(セミハード磁性膜とも呼ばれる)」である。現状で、それ自体の厚みは数 10 nm と極めて薄いものの、「媒体を支える下地層」や「磁気記録ヘッド」との絶妙な関係で、ハードディスク用材料として長年利用されてきた。本稿では、磁気記録媒体に比べ 100 ~ 1000 倍以上の厚みを有し、「小型モータの機械的駆動力」や「センサーにおけるバイアス」に利用する磁界を発生可能な材料として「厚膜磁石(磁石膜)」を取り上げる。厚膜磁石の実用的応用例は少ないものの、毎年、多くの研究者が学術論文を発表している。本稿は、永久磁石材料に馴染みのない方にも理解していただくために、以下の構成で話を進める。

- (1) 永久磁石を理解するための基礎知識
- (2) バルク永久磁石の開発動向
- (3) PLD 法を用いた厚膜磁石の開発

2. 永久磁石の基礎知識

永久磁石は、我々の日常生活に欠かせない古典的な磁性材料である事は知られている。更に、(1) 地球温暖化に見られる環境・エネルギー問題、(2) 埋蔵する元素の地域偏在化に伴う資源問題等もあり、再度見直され注目されている磁性材料でもある。永久磁石を簡単に述べると、「一度磁化されると外部磁界を取り去っても磁化(磁気分極ともいうが本稿では磁化と呼ぶ)が残り、外部に磁界を発生できる」材料である。永久磁石に要求される基本的な特性は、以下の 3 つである。

- (1) 外部に大きな磁界を発生可能である事
- (2) 外部磁界からの印加による磁化の変化が少ない
- (3) 高いキュリー点(T_c)

図 1 は、永久磁石のヒステリシスループを描いた際の第 2 象限を取り出したものである。永久磁石の場合、「外部からの印加磁界がゼロからスタートし、内部の磁化と逆向きに磁界が印加された」=「減磁曲線」を利用し、その特性を評価するケースが多い。減磁曲線上の残留磁化 J_r とは、外部印加磁界が零の時に存在している磁化の大きさであり、残留磁束密度 B_r と同じ値となる。保磁力とは、磁化と逆向きに外部印加磁界を加えたときに磁化もしくは磁束密度がゼロとなる外部磁界の強さのことである。特に、 J - H 曲線と横軸の交点である保磁力 H_c は、「固有保磁力」と呼ばれ、永久磁石のポテンシャルを表す。(本稿では特に言及しない限り「保磁力」は H_c とする) 上記の 2 つの磁気特性に加えて、永久磁石の評価には「最大磁気エネルギー積」という用語が利用される。これは、 B - H 曲線の第 2 象限で作られる磁束密度の大きさと印加磁界の大きさの積が最大となる値であり、磁石の性能を表す指標である(永久磁石が外部に発生可能な最大

図 1 減磁曲線(J - H 曲線と B - H 曲線)

の静磁気エネルギーの2倍の値となる)。

通常、永久磁石は有限な形状で利用されるため、永久磁石を着磁した後、外部磁化を零にすると、 B_r (もしくは J_r) の値ではなく、反磁界 H_d だけ逆の磁界が印加された B_d の状態となる(図2)。この物理現象を表したものが式(1)である。この式は反磁界係数を N 、パーミアンス係数を p とし、試料の形状より決まるパーミアンス線(図2に示す点線の直線)を表現している。(反磁界の増加に伴い、パーミアンス線が①から②へ変化する様子がわかる。)

$$B = -\rho\mu_0 H = -\frac{1-N}{N}\mu_0 H \cdots \cdots (1)$$

パーミアンス線と減磁曲線の交点は、永久磁石が働く点として「動作点」と呼ばれる。試料の形状を決める際、 B_d と H_d により囲まれる面積は最大になる様に設定すれば、永久磁石が外部に作り出すエネルギー(静磁エネルギー)を最大に利用でき、その値が上述した $(BH)_{\max}$ となる。パーミアンス線はいわゆる動作直線(working line)であり、永久磁石の性能を最大限引き出すには、「パーミアンス係数の制御」⇒「反磁界の制御」⇒「形状の選定」が重要となる。本稿で取り上げる「厚膜磁石」は、厚み方向(面直方向)の反磁界が著しく大きくなるため、最大の $(BH)_{\max}$ を常に利用する(そのような形状に加工する)事は難しい。従って、(1)マイクロ着磁などのような着磁方法を工夫した面直方向の磁界の利用や、(2)面内方向の磁界の利用などを考える必要がある。

話をバルク磁石に戻すと、図3は縦軸を $(BH)_{\max}$ とし、年々向上してきた永久磁石の開発の歴史を示している¹⁾。「金属系磁石」⇒「フェライト系磁石」⇒「希土類系磁石」といった大まかな流れを見る事ができる。ここでは、各磁石について簡単に説明する。

2.1 金属系磁石

1917年に本多光太郎により発見されたKS磁石を始めとして、1932年、三島徳七によるニッケル鋼にアルミニウムを添加したMK鋼、続いて増本・白石が新KS鋼を発明した。その後20年余り改良が加えられ、登場した永久磁石材料がアルニコ系磁石であり、長い間工業生産されている²⁾。アル

ニコ系磁石とはAl-Ni-Co-Feを主成分とし、特徴としてキュリー温度が高く、湿度に強い事が挙げられる。そのため、湿度や湿度の比較的高い精密計測機器等に使用されている。

2.2 フェライト系磁石

Fe_2O_3 を主成分とする磁性酸化物で構成されるフェライト材料は、ソフト及びハード両方の磁性材料に用いられてきた。永久磁石としては、1933年に加藤、武井により発表されたOP磁石($CoO \cdot Fe_2O_3$)と呼ばれるフェライト磁石が初めて報告された³⁾。その後、Baフェライト磁石やSrフェライト磁石に発展し、永久磁石の生産の大半を占めるに至った⁴⁾。特徴として、「原料が酸化鉄からなり安価」、「優れた耐食性」、「高い比電気抵抗」等が挙げられる。スピーカーを主とする音響機器を始め、様々な電気製品に使用されているものの、磁気特性は下記に述べる希土類系磁石に比較すると劣る。

2.3 希土類系磁石

1960～1970年頃からの希土類・コバルト系の材料の研究と共に、永久磁石材料の磁気特性は飛躍的な進歩を遂げ、 $SmCo_5$ 系、 Sm_2Co_{17} 系磁石が開発された⁵⁾。加えて、1983年に住友特殊金属(焼結法)とゼネラルモーターズ(GM)社(急冷法)といった異なる製造方法により $Nd_2Fe_{14}B$ 磁石が開発され、磁気特性は更に大幅に向上した⁶⁾。現在、Nd-Fe-B系磁石は最も強力な磁石材料であり、2005年にNEOMAX(現：日立金属)は、 $(BH)_{\max} = 474 \text{ kJ/m}^3$ の値を報告している⁷⁾。参考までに、表1に $Sm_2Fe_{17}N_3$ 系磁石を含めた代表的な希土類系永久磁石の特性を示す。

Nd-Fe-B系磁石は、これまで①電子機器の小型化・高性能化の要求の中で、例えばHDDの磁気ヘッドを駆動させるボイスコイルモータ(VCM)や②HV車・電気自動車用・風力発電用モータに多く用いられ、今現在、生産高ならびに生産金額が最も多い磁石である。その中で、②の用途においては、高温時での使用が避けられないため、重希土類元素のDyを添加し対応してきた。しかしながら、Dyの産出地の偏在化が材料供給の問題に発展したため、その解決を目指し、現在

図2 減磁曲線(B-H曲線)とパーミアンス線

図3 永久磁石開発の歴史(文献1より参照)

表 1 4つの希土類系化合物の特性

化合物組成	J_s (T)	H_A (MA/m)	$(BH)_{\max}$ (限界値) (kJ/m ³)	キュリー点 (°C)
SmCo ₅	1.10	23	240	727
Sm ₂ Co ₁₇	1.28	5.6	326	920
Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.61	7.6	516	312
Sm ₂ Fe ₁₇ N ₃	1.53	14	466	474

(注) $(BH)_{\max}$ (限界値)は $J_r^2/(4\mu_0)$ で計算。

多くの研究者が「Dy 削減」・「Dy レス」の Nd-Fe-B 系磁石の開発に取り組んでいる。

本稿では、Nd-Fe-B 系磁石に代表される希土類系磁石を厚膜化した「希土類系厚膜磁石」を対象に 4 章で説明する。

3. バルク永久磁石の開発動向

1900 年代後半より 2000 年代当初の「環境・エネルギー問題」が叫ばれる中、企業人を中心に注目されていた永久磁石の役割は、ここ 10 年程度の「元素戦略」に端を発して、大学や公的機関の研究所を巻き込み、学会での議論が大いに盛んとなった。その結果、異分野や若手の研究者の参入もあいまって、逆に多くの学術的課題が提供され、永久磁石の開発に対する新しいフェーズが立ち上がったものと考えられる。多くの研究成果を振り返ってみて、今なおその中心的に位置に立つ Nd-Fe-B 系焼結磁石は、例えば、中国の一部の地域における「電気自動車(以下 EV)の使用を義務付ける政策」を鑑みると、その消費量の益々の増加を予想させる。ハイブリッド車(以下 HV)や EV の「駆動用モータ」以外にも、産業用モータ、風力発電機等への使用量増加は進んでおり、更に、「世界規模での省エネへの促進」に伴うエアコンの生産量増大は、Nd-Fe-B 系永久磁石の生産増加に拍車をかけると考えられる。繰り返しになるが、Nd-Fe-B 系焼結磁石は、(1) HV や EV への用途が占める割合が激増し、将来的にもその需要が伸び続ける予想がなされると共に、(2) 元素の資源的リスクを鑑みて、より少ない Dy 量で高保磁力、かつ高耐熱である事が要求され、国内にとどまらず米国内、欧州(EU)内でいくつかの研究プロジェクトが進行し、永久磁石の研究開発は国際的な広がりを見せている。国内のプロジェクトで得られた具体的な成果としては、

- (1) 高分解能電子顕微鏡、中性子や放射光などを用いた組織学的に検証する評価解析技術の進展を利用して、Nd-Fe-B 系焼結磁石の保磁力向上に貢献する「結晶粒微細化」や「粒界拡散・Ga 添加等による粒界相制御」などの材料創製プロセス技術の進展
- (2) (1)の成果を下に、学術的に「ニュークリエーション型」と呼ばれてきた磁化過程へ疑問を呈する「大型計算機を利用した計算機解析技術や磁区構造観察技術」の進展などが挙げられる。

その一方、(1) Nd₂Fe₁₄B 相の異方性磁界に対し依然として大きな隔たりのある Nd-Fe-B 系焼結磁石の保磁力値の向上技術探索や(2)新たに開発された微細結晶粒組織を有する Nd-Fe-B 系焼結磁石の着磁技術やモータ応用等、取り組むべき課題は多い。

Nd-Fe-B 系焼結磁石以外でも、Dy フリー磁石として HV

車に始めて搭載され注目を浴びた Nd-Fe-B 系熱間加工バルク磁石やフェライト磁石の応用分野の牙城を切り崩し始めた「高性能 Nd-Fe-B 系異方性ボンド磁石」・「Sm-Fe-N 系ボンド磁石(等方性および異方性)」も今後の進展が期待される。高抵抗による永久磁石自身の渦電流損失抑制の観点より注目されるフェライト磁石において、最新の材料として LaCoCa 系 M 型フェライト磁石が報告される一方、古くより知られている希土類磁石であるものの、新規な材料創成プロセスの導入で開発段階にある Sm-Fe-N 系焼結磁石、飽和磁気分極の増加を図った Sm-Co 系焼結磁石などの新しい高性能材料の研究も注目に値する。加えて、計算科学をもとに結晶構造と構成元素から磁気的性質を明らかにし提案された新規化合物が、実験においても検証された高飽和磁気分極・高異方性磁界の NdFe₁₂N_x 化合物など、次世代の希土類磁石も更なる進展が期待される。

前章と本章を読んでいただいた中で、永久磁石に少しでも興味を持っていたいただければ幸いです。

4. PLD 法を用いた厚膜磁石の開発

4. 1 Nd 元素の線膨張係数に着目した Si 基板上 Nd-Fe-B 系厚膜磁石の作製

少し遠回りをしましたが、ここで本題となります「厚膜磁石」の内容に入ります。多くの研究者により、永久磁石材料(主に金属系磁石や希土類系磁石)が、スパッタリング法を代表とした成膜プロセスにより磁石膜として開発されてきた経緯にご興味のある方は、拙著^{8),9)}をお読みいただければと思います。本稿では、筆者らが最近報告している Nd-Fe-B 系厚膜磁石の作製を中心に紹介します。なお、一部の内容が、磁気学会誌掲載のトピックス記事「レーザ蒸着法による硬磁性膜の作製」¹⁰⁾と重複することをお許しいただければ幸いです。

「小型の永久磁石の開発」を追求する一つの理由は、体積の小さな永久磁石を搭載したデバイスが既存のものに比べ、より小型・軽量化が実現できるのはもちろんのこと、同じ体積のデバイスであるならば余剰のスペースに他のデバイスを搭載する事でデバイスの高機能化が期待されるためである。例えば、実機のモータは、希土類系ボンド磁石の体積を減少させる事で、小型・軽量化が進められてきた¹¹⁾。バルク材料ではなく、成膜手法を用いて作製した「厚膜磁石」の小型モータへの搭載としては、研究開発ベースであるものの、1991 年山崎らによりスパッタリング法を用いた 20 μm 厚異方性 Nd-Fe-B 系厚膜磁石の報告¹²⁾を始めとし、PLD (Pulsed Laser Deposition) 法を用い Fe 基板をヨークとして利用した厚さ約 200 μm 試料の Nd-Fe-B 系厚膜磁石の作製と小型 DC モータへの応用(図 4)が筆者らのグループより報告されている¹³⁾。

一方、スパッタリング法を用い、シリコンやガラス等の非金属基板上に 10 μm 以上に膜厚増加させた Nd-Fe-B 系厚膜磁石が、MEMS (Micro-electromechanical system) 用の材料として利用できる可能性が複数の研究者により示唆されている^{14)~16)}。そのような成果に刺激を受け、筆者らも、紫外線波長のパルスレーザを Nd-Fe-B 系ターゲット表面に Defocus させ照射し、数 μm 径の微粒子を大量に発生させる手法により、数 10 $\mu\text{m}/\text{h}$ の比較的高速な成膜速度下で作製した。具体的には、

下記の式(2)で与えられる *DF rate* (Defocus rate)を「集光レンズとターゲット間の距離 *TD*」を制御し、0.1 以上とした。ここで、*FD* は集光レンズの集光距離を意味する。

$$DF\ rate = (TD - FD) / FD \dots\dots\dots (2)$$

レーザパワーは4 W 程度、レーザの照射面積より見積もったエネルギー密度は数 J/cm² である。本照射条件で成膜した際、ターゲットは幅広くかつ、浅くエッチングされ、上述した数 μm 径の微粒子を得られる。結果的に Si 基板上に 160 μm まで厚膜化でき¹⁷⁾、Nd-Fe-B 系厚膜磁石の線膨張係数と著しく異なる値を持つ Si 基板上に 100 μm 以上の膜厚増加を達成するにあたり、線膨張係数を制御することで実現している。具体的には、Nd₂Fe₁₄B 相と Si 基板の線膨張係数の差を起源とする成膜時もしくは熱処理時の内部応力が、「磁石膜の剥離」もしくは「基板の破壊」現象を引き起こすことは知られているため¹⁸⁾、Si と Nd₂Fe₁₄B の間(あいだ)の線膨張係数を有する Nd 元素を図 5 に示す様に化学量論組成に比べ試料内に著しく含有させ、熱処理時のアモルファス構造から結晶化する過程において、①粒界相、②三重点、③基板と磁石膜の界面に Nd 元素を自己組織的に析出させている。本試料の作製プロセスを通じて、スパッタリング法では報告されている「Si 基板からの Nd-Fe-B 系磁石膜の剥離現象」が、我々の実験では観察されないことに疑問を持ち、厚膜磁石と Si 基板上の界面に存在する酸化膜の存在に着目した。具体的には、

図 4 直径：5 mm，厚み：0.8 mm の小型 DC モータ
(PLD 法で作製した 0.2 mm 厚の Nd-Fe-B 系厚膜磁石内蔵)

図 5 Si 基板上に作製した Nd-Fe-B 系厚膜磁石の Nd 含有量(Nd/(Nd+Fe))と破壊なく得られた厚膜磁石の最大膜厚の関係

数 nm 厚の自然酸化膜と共に、厚さの異なる 3 種類の熱酸化膜を持つ Si 基板を準備し、各々の磁気特性と機械特性に及ぼす影響を検討した。実験の手順を以下に説明する。

- ①真空度 10⁻⁵ Pa 程度のチャンバー内で回転する Nd-Fe-B 合金ターゲットに、Nd-YAG パルスレーザを照射することで、ターゲットを構成する分子や原子等を解離・放出させ、対面に設置した熱酸化膜(20, 100, 500 nm 厚程度)と自然酸化膜(約 1 nm 厚)を各々有する(100)単結晶 Si 基板上に堆積した。その際、レーザパワーを 4 W、ターゲットと基板間の距離を 10 mm に固定した。
- ②成膜直後の試料はアモルファス構造であるため、3.5 ~ 3.7 sec の極短時間での熱処理を施し、Nd₂Fe₁₄B 相を形成させると共に、その際に発生する試料の破壊現象を観察した。膜組成評価には SEM-EDX、微細構造観察には TEM を用いた。

Nd 含有量(Nd/(Nd+Fe))を約 20 at.% で固定した 10 μm 厚以上の Nd-Fe-B 系磁石膜を上記の 4 種類の Si 基板上に成膜し、熱処理時の試料の破壊現象を比較した結果、酸化膜の厚みの増加に伴い、熱処理時の破壊が起きなかった試料での最大膜厚が増加した。破壊が生じた際の様子を観察すると、自然酸化膜と 20 nm 厚の熱酸化膜を有する基板を用いた試料は、Si 基板から磁石膜が剥離する一方、100 nm 厚の熱酸化膜のものでは、剥離ではなく、Si 基板の内部から常に破損した。すなわち、後者の試料(100 nm 厚の熱酸化膜を用いたもの)では基板と厚膜磁石の強い密着性が観察された。酸化膜の厚みの変化により、破壊現象が異なる原因を調べるために、500 nm 厚の熱酸化膜付 Si 基板上の試料における熱処理後の微細構造とその元素分布を TEM 観察したところ、Si 基板と Nd-Fe-B 系磁石膜の界面に、Fe、Si、O 元素よりなる約 100 nm 厚の化合物層が確認された。現在のところ、この化合物は酸化膜の厚みの増加に伴い、より形成しやすい事が推察され、異なる密着性を生じさせたものと考えられる。500 nm 厚の熱酸化膜付き Si 基板上に作製した試料に関しては、スクラッチ試験を通じて、優れた密着性を確認するとともに¹⁷⁾、図 6 に示す様に約 120 μm 厚の Nd-Fe-B 系厚膜磁石にダイシング加工を施した際も、破面での破壊現象ならびに磁気特性の劣化が生じない事を確認した。

図 6 5 mm 角の Nd-Fe-B 系厚膜磁石を 4 等分にダイシング加工した様子(厚膜磁石の厚み：約 120 μm)

4. 2 ガラス下地層を利用した Si 基板上 Nd-Fe-B 系厚膜磁石の磁気特性向上

上述の「Nd 含有量の増加」ならびに「数 100 nm 厚の熱酸化膜の存在」に着目した, Si 基板上への Nd-Fe-B 系磁石膜の作製は 100 μm を超える厚膜化を実現した一方, 多量の Nd 含有量が非磁性相として存在し, 残留磁気分極や $(BH)_{\text{max}}$ の低下を招く。そこで筆者らは, 酸化膜に比べ厚みを増加させた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。ターゲットとして使用したガラスは市販の松波硝子工業製 S1111 であり, 成膜条件として, 式(2)で与えられる DF rate (Defocus rate) を 0 と固定, レーザのエネルギー密度として 20 J/cm² の条件で作製した。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。

ガラス下地層の有無が破壊現象の抑制に及ぼす影響を検討したところ, 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, 上述の 500 nm 厚熱酸化膜付き Si 基板上に磁石膜を成膜した際に基板破壊していた領域(Nd 含有量: 10 ~ 15 at. %)で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/m³ 増加, $(BH)_{\text{max}}$ の最大値として 70 kJ/m³ 程度の試料が作製できることが確認された。

5. おわりに

本稿では, 「永久磁石を理解する上での基礎的な内容」ならびに「バルク永久磁石の最近の動向」を簡単に説明した後, 「高真空での YAG レーザを用いた蒸着法による Nd-Fe-B 系厚膜磁石の Si 基板への開発」に関する内容を主に紹介した。将来的に厚膜磁石が「MEMS 応用」に至るまで様々なブレークスルーが必要と考えられる。今後も様々な成膜法により厚膜磁石の開発を進めている研究者・技術者, 更には MEMS を専門とする研究者・技術者と議論を重ねながら, 社会に貢献できる材料開発に携わる所存である。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり, 精力的に実験に携わっていただいた押領司学氏(現: 富士電機(株)), 大島修一氏(現: 東芝エレベータ(株)), 竹馬雄氏(現: (株)安川電機), 廣瀧敬士氏(現: マツダ(株)), 清水大氏(現: (株)安川電機), 黒崎陽氏(現: 富士電機(株)), 田中駿也氏(現: JX 金属(株)), 藤原良元氏(現: TDK (株)), 山口雄太氏(長崎大学大学院), 尾本昌隆氏(長崎大学大学院), 山口貴士氏(長崎大学大学院), 竹市蕉氏(長崎大学大学院)に深く感謝申し上げます。

(Received September 10, 2018)

文 献

- 1) 杉本 諭; ナノ構造磁性体, p.231 (株)共立出版, 2010).
- 2) 一ノ瀬昇, 日口 章(編著); 磁石材料の新展開 p.8 (株)工業調査会, 1993).
- 3) 山部恵造; 磁石のふしぎ 磁場のなぞ, p.116 (株)けやき出版, 2009).
- 4) (社)未踏科学技術協会(編); おもしろい磁石のはなし, p.80 (日刊工業新聞社, 1998).
- 5) 電気学会; 磁気工学の基礎と応用, p.92 (コロナ社, 1999).
- 6) 一ノ瀬昇, 日口 章(編著); 磁石材料の新展開, p.10 (株)工業調査会, 1993).
- 7) 佐川真人(編); 永久磁石—材料科学と応用—, p.41 (株)アグネ技術センター, 2007).
- 8) 中野正基, 柳井武志, 山下文敏, 福永博俊; 日本金属学会誌, **76**, 59 (2012).
- 9) 中野正基, 柳井武志, 藤井泰久, 松本信子, 福永博俊; まぐね(日本磁気学会誌), **9**, 211 (2014).
- 10) 中野正基, 山下昂洋, 柳井武志, 板倉 賢, 藤原良元, 進士忠彦, 福永博俊; まぐね(日本磁気学会誌), **12**, 26 (2017).
- 11) F. Yamashita, S. Nishimura, O. Kobayashi, M. Itoh, M. Nakano, H. Fukunaga, K. Ishiyama; *Journal of Applied Physics*, **109**, 07A712-1 (2011).
- 12) S. Yamashita, J. Yamasaki, M. Ikeda, N. Iwabuchi; *J. Appl. Phys.*, **70**, 6627 (1991).
- 13) M. Nakano, S. Sato, F. Yamashita, T. Honda, J. Yamasaki, K. Ishiyama, M. Itakura, J. Fidler, T. Yanai, H. Fukunaga; *IEEE Transactions on Magnetics*, **43**, 2672 (2007).
- 14) 小峠竜也, 藤田孝之, 田中祐至, 上原 稔, 神田健介, 樋口行平, 前中一介; 電気学会マグネティクス研究会資料, **169**, 7 (2012).
- 15) R. Fujiwara, T. Shinshi, E. Kazawa; *Sensors and Actuators A: Physical*, **220**, 298 (2014).
- 16) N. M. Dempsey, A. Walther, F. May, D. Givord, K. Khlopkov, O. Gutfleisch; *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 092509 (2007).
- 17) M. Nakano Y. Chikuba, M. Oryoshi, A. Yamashita, T. Yanai, R. Fujiwara, T. Shinshi, H. Fukunaga; *IEEE Transactions on Magnetics*, **51**, 2102604 (2015).
- 18) 安達信泰, 伊佐泰紀, 太田敏孝; セラミックス基盤工学研究センター年報, **6**, 46 (2006).