

Nd-Fe-B 系焼結磁石における隣接粒子間方位差と磁化反転の関係

Influence of Misorientation Angle between Adjacent Grains on Magnetization Reversal in Nd-Fe-B Sintered Magnet

榎 智仁*
Tomohito Maki

石井 倫太郎*
Rintaro Ishii

森田 充俊*
Mitsutoshi Natsumeda

西内 武司*
Takeshi Nishiuchi

打越 凌**
Ryo Uchikoshi

竹澤 昌晃**
Masaaki Takezawa

保磁力の配向度依存性と角度依存性の違いを明らかにすることを目的とし、配向度の異なる Nd-Fe-B 系焼結磁石の結晶方位分布と減磁曲線を比較した結果、Nd-Fe-B 系焼結磁石の低配向度による保磁力の増加は保磁力の角度依存性のみでは説明できず、配向度低下によって磁壁移動が抑制されている可能性を示した。結晶方位解析と磁界中磁区観察を同一視野で行った結果、隣接粒子間方位差が大きいほど磁化反転の止まる粒界の割合が大きくなっており、配向度低下による磁壁移動の抑制に隣接粒子間方位差が寄与していることが示唆された。

To clarify the difference in orientation dependence and angular dependence of coercivity, the crystal orientation distribution and demagnetization curves of Nd-Fe-B based sintered magnets with different degrees of orientation were compared. Our results suggest that the increase in coercivity due to the low degree of orientation of the Nd-Fe-B sintered magnet cannot be explained solely by the angular dependence of coercivity, and the domain wall movement is suppressed by the decrease in the degree of orientation. Based on the results of the crystal orientation analysis and the in-situ observation of the magnetic domain in the same position, the larger the misorientation angle between adjacent grains is, the larger the ratio of grain boundaries which magnetization reversal stops. It is suggested that the misorientation angle between the adjacent grains contribute to the suppression of domain wall movement due to the decrease in the degree of orientation.

● Key Word : Nd-Fe-B, 保磁力, 配向度
● Production Code : Nd-Fe-B magnet

● R&D Stage : Research

1. 緒言

Nd-Fe-B 系焼結磁石は家電・産業用モーター、電気自動車 (EV: Electric Vehicle) やハイブリッド自動車 (HEV: Hybrid Electric Vehicle) の駆動用モーターや電動パワーステアリング (EPS: Electric Power Steering) 用モーターなどの製品で使用され、これらの小型化・高性能化に貢献している。EV・HEV の世界的な市場拡大に伴い駆動用モーターや EPS 用モーター市場も成長が見込まれるが、これらに使用される永久磁石には高温環境下でも減磁の少ない高耐熱材料が必要とされている。耐熱性を向上させるひとつの方法としては保磁力向上があり、一般には Dy や Tb といった重希土類元素を添加して主相である $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物の結晶磁気異方性を増加させることで高保磁力とし、高温での不可逆熱減磁を抑制することが行われている。使用環境が高温であるほど、より高保磁力の材料が求められ、重希土類元素の添加量も増加する。しかしながら重希

土類元素は資源リスクの高い原料として認識されており、これらの使用量を削減したうえで高保磁力・高耐熱性を有する磁石材料に対する要望が強い。

Nd-Fe-B 系磁石の保磁力は、前述の重希土類元素添加だけでなく磁石内の微細組織によっても大きく変化する。特に粒界に存在する Nd リッチ相が保磁力に重要な役割を果たすことが指摘されており^{1)~3)}、Nd リッチ相が磁壁移動を阻害する様子が観察されている^{4), 5)}。また Nd-Fe-B 系焼結磁石の保磁力は主相粒子の配向度に強く依存し、配向度が低下するほど保磁力が増加することが経験的に知られている^{6)~8)}。同様の傾向を示す現象として、磁化測定の際に Nd-Fe-B 系焼結磁石の配向方向と外部印加磁界の角度のずれ θ が大きくなると保磁力が増加すること (保磁力の角度依存性) が報告されており⁹⁾、保磁力が $1/\cos \theta$ の割合で増加するとした磁壁移動モデルによって説明される。保磁力の配向度依存性を角度依存性および配向分布によって説明する試みがなされている^{7), 8)}が、十分に理解

* 日立金属株式会社 磁性材料カンパニー
** 九州工業大学

* Magnetic Materials Company, Hitachi Metals, Ltd.
** Kyushu Institute of Technology

されたとはいえない。配向度が低下した場合、**図 1**に示す印加磁界 H と各結晶粒の磁化容易軸の方位差 θ の分布が広がることは容易に予想されるが、隣接粒子間の磁化容易軸の方位差 ϕ の分布も同時に変化すると考えられる。この ϕ 分布の変化が磁壁移動および保磁力に関わっている可能性があるが、実験的に確かめた例は報告されていない。

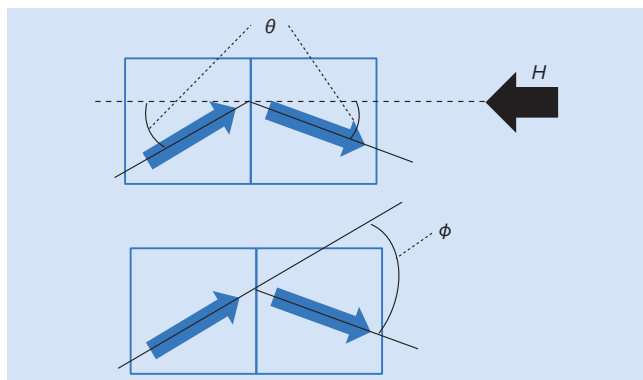


図 1 各結晶粒の磁化容易軸と印加磁界 H との方位差 θ および隣接粒子間の磁化容易軸の方位差 ϕ の模式図

Fig. 1 Schematic illustrations of the misorientation angle θ between the easy axis of magnetization of each grain and the applied magnetic field H , and the angle ϕ between the easy axis of magnetization of each grain and adjacent grains

また、材料中の組織と磁区構造の関係を明らかにするには、実験によって直接観察することが有効である。Nd-Fe-B 系磁石表面の磁区構造評価手法は、磁気光学カー顕微鏡^{10), 11)}、ローレンツ透過型電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscope)^{4), 5)}、電子線ホログラフィー¹²⁾、磁気力顕微鏡 (MFM: Magnetic Force Microscope)^{13), 14)}、スピン偏極走査型電子顕微鏡 (スピン SEM: Spin-Polarized Scanning Electron Microscopy)^{15), 16)} などさまざまな方法で行われている。その中で磁気光学カー顕微鏡は高磁界中での場観察を行うことができるため、Nd-Fe-B 磁石の磁化反転挙動を直接観察できる有効な手法のひとつである¹⁷⁾。Takezawa らは Nd-Fe-B 系焼結磁石の磁界中その場磁区観察を行い、複数の粒子が磁化容易軸方向に沿って同時に磁化反転し、印加磁界が増加すると隣接する粒子に磁化反転が伝播することを示した^{18), 19)}。この結果は磁化反転の伝播を粒子集団で理解する必要があることを示しており、比較的広い視野で観察可能な磁気光学カー顕微鏡はこの点でも有効である。しかしながら研磨した磁石表面では磁石全体の保磁力 (バルク保磁力) に対応する印加磁界よりも明らかに小さい印加磁界で磁化反転が進行するため、研磨面と磁石内部の違いがしばしば議論となる。そのため、破断面を利用した表面保磁力低下の抑制といった手法も研究されている²⁰⁾。研磨面と磁石内部の類似点・相違点を明確に理解することができれば、磁石表面の解析に対し、より有益な議論が可能になると考えられる。

本研究では、はじめに保磁力の配向度依存性と角度依存性の違いを明らかにすることを目的とし、配向度の異なる Nd-Fe-B 系焼結磁石の θ 分布および ϕ 分布を調べるとともに印加磁界と試料との角度を変化させて保磁力を測定し

た。続いてリコイルカーブ²¹⁾を用いて磁化過程解析を行った。次に、Nd-Fe-B 系焼結磁石におけるバルク保磁力と研磨した表面層の保磁力の相関を明らかにするため、組成、熱処理条件、配向度がこれらにおよぼす影響を調べた。最後に、Nd-Fe-B 系焼結磁石における隣接粒子間方位差と磁区構造の関係を実験的に評価することを目的とし、走査電子顕微鏡および電子後方散乱回折 (SEM/EBSD: Electron Back Scatter Diffraction Patterns) による結晶方位解析と磁気光学カー効果顕微鏡による磁界中その場磁区観察を同一視野で行った。このような研究を通して配向度による保磁力変化のメカニズムを解明できれば、高残留磁束密度と高保磁力を両立する組織制御手法の提案につながり、重希土類元素の使用量削減に貢献できる。

2. 保磁力の配向度依存性と角度依存性の関係

2.1 実験方法

組成を質量比で 30.2Nd-67.6Fe-1.0B-0.9Co-0.1Al-0.1Cu-0.1Ga (以下 mass% と示す) とした原料合金を粉砕後、プレス時に印加磁界を変化させることで配向度の異なる 2 水準の焼結磁石 (高配向 (HA) および中配向 (MA)) を作製した。高配向磁石の磁気特性は残留磁束密度 $B_r=1.44$ T, 保磁力 $H_{cJ}=1.038$ kA/m, 中配向磁石は $B_r=1.33$ T, $H_{cJ}=1.126$ kA/m であった。各試料の配向分布は、磁石の磁化容易方向に平行な面の研磨面を SEM/EBSD にて観察した結果を解析した。磁化測定は、形状による反磁界を一定とするため、焼結磁石を球体に加工して行った。5.6 MA/m のパルス磁界によって着磁した後、減磁曲線を振動試料型磁力計 (VSM: Vibrating Sample Magnetometer) にて 1.6 MA/m ~ -1.6 MA/m の範囲で測定した。試料の磁化容易方向に対する印加磁界の角度を変化させる場合は、再度パルス着磁した試料を VSM にセットし、試料に対して電磁石を 1° ピッチで回転させて測定を行った。各減磁曲線は球の反磁界係数 $N=0.33$ として補正を行った。リコイルカーブ測定は過去報告²¹⁾と同様に、減磁曲線の第二、第三象限において減磁界を 40 kA/m ずつ増加させて 0 kA/m まで戻る操作を繰り返して行った。

2.2 θ 分布および ϕ 分布

図 2 に左右方向を配向方向とした高配向磁石および中配向磁石の EBSD による逆極点方位マップを示す。高配向磁石に比べ、中配向磁石は結晶方位の乱れが大きいことがわかる。印加磁界 H と磁化容易軸の方位差 θ は各結晶粒の $\langle 001 \rangle$ 方向と配向方向 (y 方向) の方向余弦から計算し、隣接粒子間の磁化容易軸の方位差 ϕ は隣接粒子の $\langle 001 \rangle$ 方向同士の方向余弦から求めた。**図 3 (a) ~ (d)** に両試料の θ 分布および ϕ 分布を示す。高配向磁石に比べて中配向磁石は θ 分布、 ϕ 分布ともにブロードであり、高角度側の頻度が大きい結果であった。このことから、配向度が低下すると配向分布のみでなく隣接粒子間の方位差も広い分布を有することがわかった。

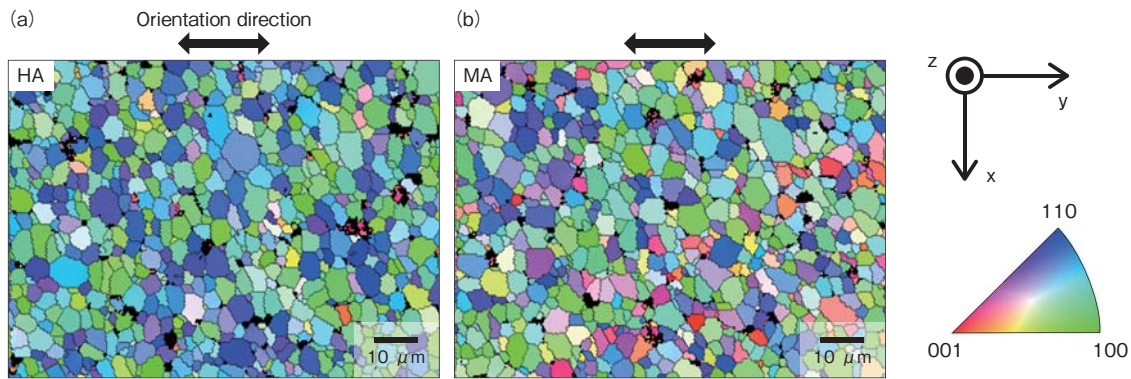


図2 逆極点方位マップ (a) 高配向磁石 (HA) (b) 中配向磁石 (MA)

Fig.2 Inverse pole figure maps of the $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ phases of (a) highly aligned (HA) magnet and (b) moderately aligned (MA) magnet

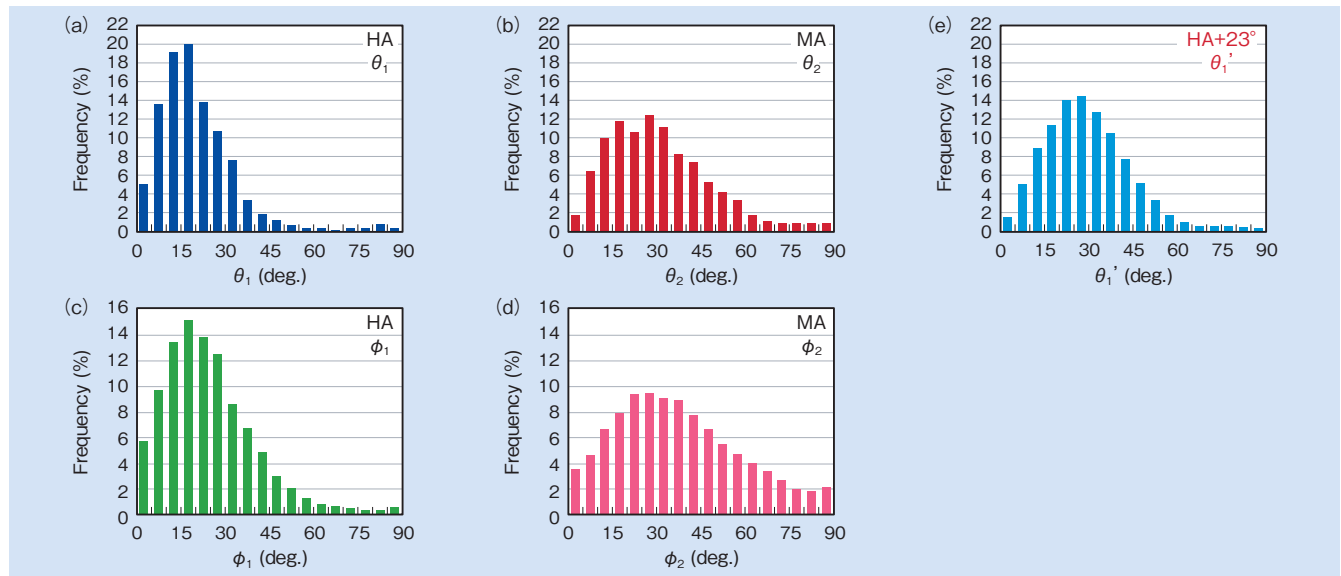


図3 (a)～(d):高配向磁石および中配向磁石の θ , ϕ 分布, (e):配向方向から 23° 傾いた方向から見た方位分布を計算した高配向磁石の θ' 分布

Fig.3 (a) - (d) Distributions of θ and ϕ for HA magnet and MA magnet and (e) distribution for θ' of MA magnet calculated along a direction tilted 23° with respect to the orientation direction

2.3 配向度と角度および保磁力の関係

図4は、高配向磁石、中配向磁石および高配向磁石を印加磁界方向に対して 23° および 48° 傾けて測定した場合の減磁曲線を示す。高配向磁石を印加磁界に対して 23° 傾けて測定すると、中配向磁石と角形比 J_r/J_s がほぼ同じであるにもかかわらず中配向磁石よりも明らかに低保磁力であった。なお中配向磁石と同程度の保磁力とするには高配向磁石を印加磁界に対して 48° まで傾ける必要があり、両者の減磁曲線の形状は全く異なるものとなる。ここで、図3(a)で示した高配向磁石の θ 分布に対し、意図的に 23° ずれた方向から方位分布を計算した θ' 分布を図3(e)に示す。 θ' 分布は中配向磁石の θ 分布と同様な分布形状であった。したがって 23° 傾けた高配向磁石と中配向磁石はほぼ同じ配向分布をもっていることになり、減磁曲線において J_r/J_s が同じであることと整合する。このことは両試料の保磁力の角度依存性による保磁力の増加分は同等であることを意味しており、低配向度による保磁力の増加が保磁力の角度依存性のみでは説明できないことを示している。

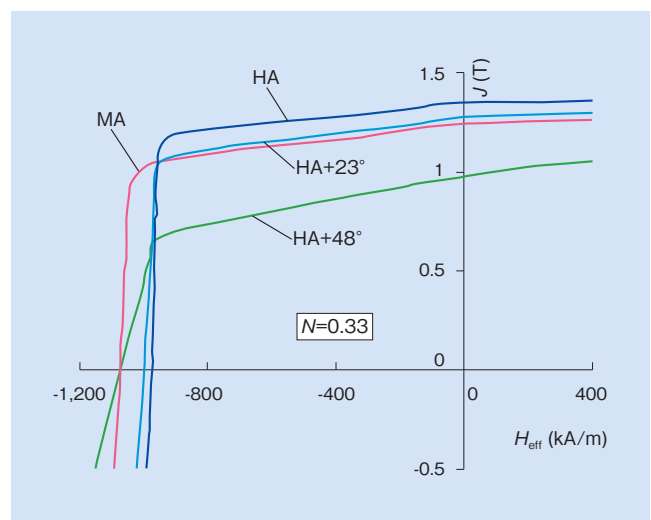


図4 高配向磁石 (HA), 中配向磁石 (MA), および高配向磁石を磁界方向に対して 23° および 48° 傾けて測定した減磁曲線 (球状試料, $N=0.33$ で反磁界補正)

Fig.4 Demagnetization curves measured with the HA magnet, MA magnet, and HA magnet tilted at 23° and 48° with respect to the magnetic field direction (spherical sample, demagnetizing factor $N=0.33$)

両試料の磁化過程の違いを明らかにするため、リコイルカーブの測定を行った。図 5 (a) に中配向磁石および印加磁界に対して 23° 傾けた高配向磁石のリコイルカーブ、図 5 (b) に原点付近に戻るリコイルカーブを抜き出したものを示す。中配向磁石のリコイルカーブの曲率は 23° 傾けた高配向磁石の曲率よりも小さかった。過去の報告²¹⁾は、平均で数 μm の結晶粒径を有する Nd-Fe-B 系焼結磁石のリコイルカーブには磁壁移動成分が含まれることを指摘しており、リコイルカーブの曲率が小さいことは、中配向磁石で磁壁移動が少ないことを示唆している。図 3 で示したように中配向磁石は粒子間方位差 ϕ の分布が大きく、このことが磁壁移動の抑制に関わっている可能性がある。

3. 磁化反転過程におよぼす隣接粒子間方位差の影響

3.1 実験方法

はじめに Nd-Fe-B 系焼結磁石においてバルク保磁力と表面層の保磁力の相関を明らかにするため、組成、熱処理条件、配向度を変化させて保磁力の異なる試料を作製し、これらのバルク保磁力および表面層の保磁力を測定した。合金組成は $(30.2-x)\text{Nd}-x\text{Dy}-67.6\text{Fe}-1.0\text{B}-0.9\text{Co}-0.1\text{Al}-0.1\text{Cu}-0.1\text{Ga}$ (mass%) ($x=0, 1.0, 2.0, 5.0$) で表される Dy 量の異なる 4 組成とした。前章と同様、プレス時に印加磁界を変化させることで高配向度および中配向度の焼結磁石をそれぞれ作製した。焼結後の熱処理温度は $460 \sim 540^\circ\text{C}$ で変化した。各試料は平面研削盤による同一研削条件で 7 mm 角とし、減磁曲線を BH トレーサーにて測定した。表面層の保磁力は、図 6 に示すように減磁曲線の第二象限に現れるクニックの微分値から求めた。なお保磁力が $1,600\text{ kA/m}$ 以上の場合のバルク保磁力はパルス BH トレーサーにて測定した値を用いた。

磁区観察に用いる焼結磁石組成は Dy 量の異なる 2 組成 ($x=0, 5.0$) とし、中配向度のものを用いた。試料を 3 mm 角に切断し、磁石の磁化容易方向に平行な面を研磨して観

察面とした。まず、研磨面の中央で SEM/EBSD による組織観察および結晶方位解析を行い、その後、磁気光学カー顕微鏡による磁区観察を行った。試料表面には反射防止のため SiO 膜をスパッタリングにより成膜した¹⁸⁾。試料を 4.0 MA/m のパルス磁界で配向方向に着磁した後、磁気光学カー顕微鏡にセットし、試料に $1.6 \sim -1.6\text{ MA/m}$ の範囲で磁界を印加しながら磁区変化を動画で撮影した。観察像のコントラストの変化から磁化反転を検出し、反転領域を画像処理¹⁸⁾によって抽出した。観察領域における有効磁界を求めるため、立方体形状 Nd-Fe-B 磁石の磁化容易方向に平行な面の中心における反磁界を三次元有限要素法を用いて計算した。有効磁界 H_{eff} は、 H_{ex} を外部磁界、 H_{d} を試料からの反磁界として $H_{\text{eff}}=H_{\text{ex}}-H_{\text{d}}$ の関係より求めた。例えば $x=0$ の場合、 $H_{\text{ex}}=0\text{ kA/m}$ のとき $H_{\text{eff}}=-250\text{ kA/m}$ となる。

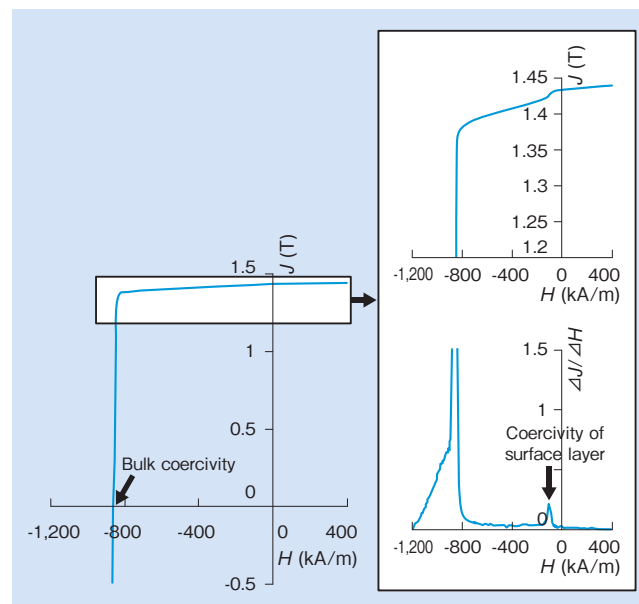


図 6 バルク保磁力と表面層保磁力の説明図

Fig. 6 Illustration of bulk coercivity and coercivity of surface layer

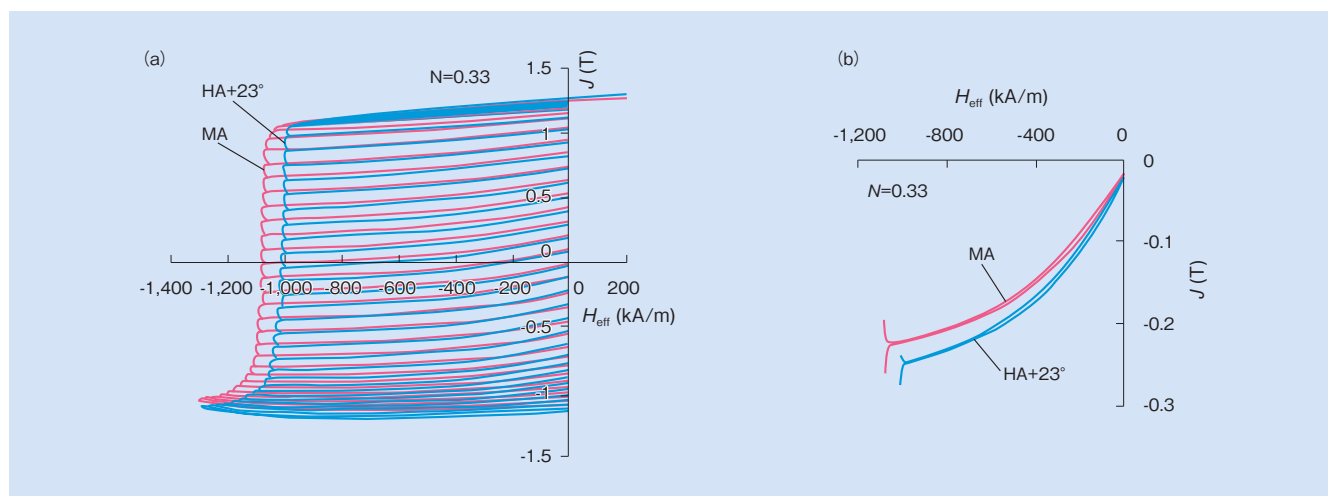


図 5 (a) 中配向磁石 (MA) および高配向磁石 (HA) を磁界方向に対して 23° 傾けて測定したリコイルカーブ、(b) 原点付近に戻るリコイルカーブの比較

Fig. 5 (a) Recoil curves of MA magnet and HA magnet measured along a direction titled 23° with respect to the magnetic field direction, (b) comparison of two recoil curves returning to near the origin

3.2 バルク保磁力と表面層保磁力の関係

図7に配向度、Dy量および熱処理条件を変化させたときのバルク保磁力と表面保磁力の関係を示す。配向度一定の条件でDy量および熱処理温度によってバルク保磁力が変化すると、これに比例して表面層の保磁力も変化することがわかった。このことから焼結磁石の表面層であってもDy量によって変化する主相の物性（飽和磁化、結晶磁気異方性）および熱処理によって変化する粒界組織に依存して保磁力が決まっており、表面層においても磁石内部と類似した機構で磁化反転が起こっていることが示唆される。

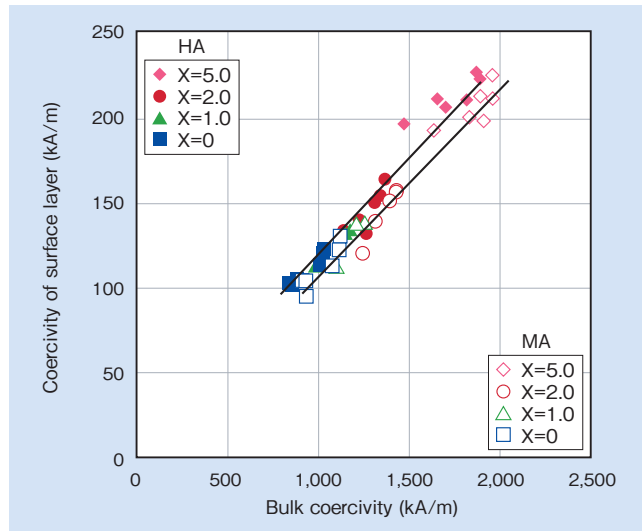


図7 高配向磁石 (HA) および低配向磁石 (MA) の表面層保磁力とバルク保磁力の関係
Fig.7 Coercivity of surface layer vs. bulk coercivity for HA magnets and MA magnets

なお同一組成、同一熱処理条件で配向度が異なる試料間を比較すると、バルク保磁力は高配向磁石よりも中配向磁石のほうが大きいですが、表面層保磁力は同程度の値であった。この理由として、図2の方位分布が示すように配向度が低下すると表面層において試料面直方向に磁化容易軸が傾いた粒子が増加するため、局所的に反磁界が増大して磁化反転が起こりやすくなった可能性が考えられる。そこで、試料表面の粒子の結晶方位の傾きによる反磁界の変化をモデル化し、三次元有限要素法を用いて計算した。図8(a)の模式図に示すように、 $3 \times 3 \times 3$ (mm)の立方体形状Nd-Fe-B磁石の磁化容易方向に平行な面の表面に $1 \times 1 \times 1$ (mm)の立方体粒子が存在すると仮定し、この粒子の磁化容易軸のみを面内方向($Y \rightarrow X$)および面直方向($Y \rightarrow Z$)にそれぞれ θ_{YX} , θ_{YZ} だけ回転させた。 θ_{YX} , θ_{YZ} を $0 \sim 45^\circ$ としたときのパーミアンス係数 P_c の分布を図8(b)に示す。1mm角粒子表面における P_c 分布は、回転方向が面内方向の場合に比べて面直方向のほうが大きく変化した。 θ_{YX} , θ_{YZ} に対する1mm角粒子表面の平均の P_c の変化を図9に示す。 θ_{YX} が変化しても P_c はほとんど変化しないのに対し、 θ_{YZ} が増加するほど P_c は減少した。したがって $N=1/(1+P_c)$ の関係より、試料面直方向に磁化容易軸が傾いた粒子は反磁界が大きくなることが示唆された。

3.3 磁化反転の伝播と粒子間方位差の関係

図10, 図11に $x=0, 5.0$ の減磁過程におけるそれぞれの磁区観察結果から抽出した、各磁界 H_{eff} における磁化反転領域を示す。試料中の粒界は白い点線で示した。なお磁化

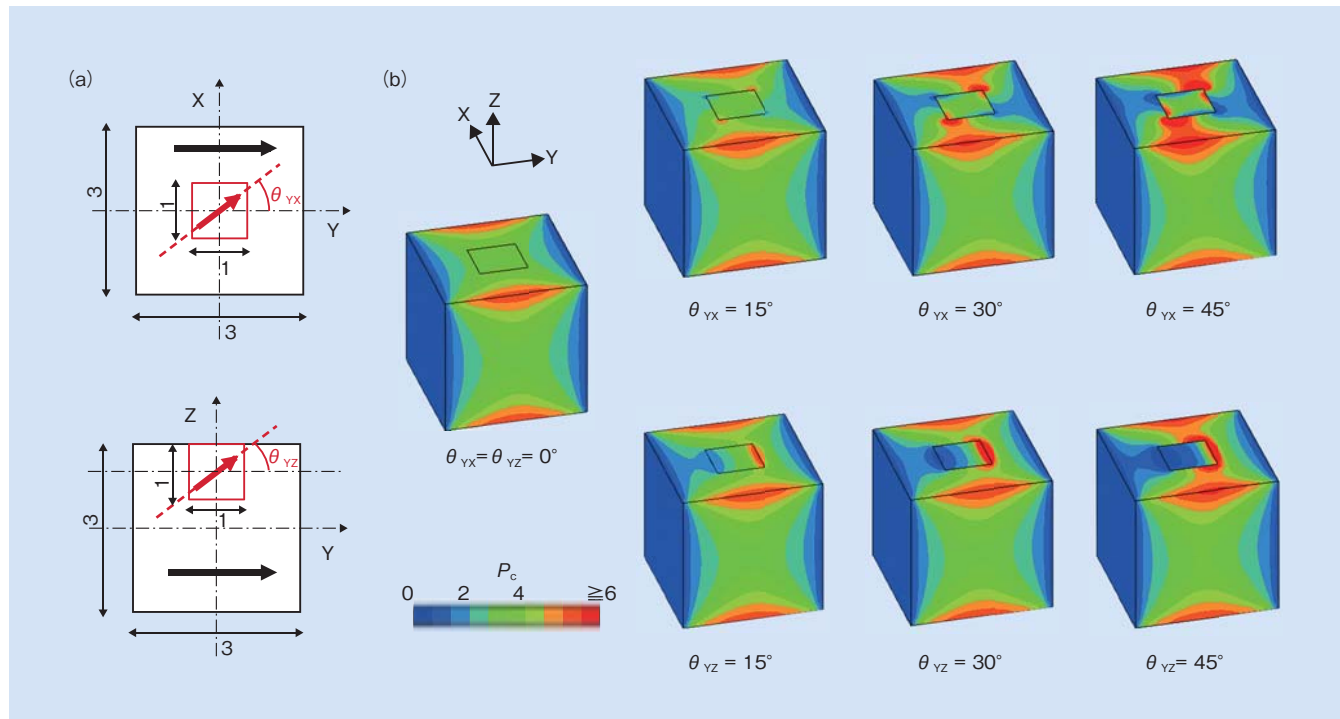


図8 (a) 三次元有限要素法による計算に用いたNd-Fe-B焼結磁石モデルの模式図および(b) θ_{YX} , θ_{YZ} をそれぞれ $0 \sim 45^\circ$ で変化させたときのパーミアンス係数 P_c の分布図
Fig.8 (a) Model of Nd-Fe-B sintered magnet for calculation using a three-dimensional finite element method and (b) distribution of permeance coefficient P_c when θ_{YX} and θ_{YZ} are varied from 0 to 45°

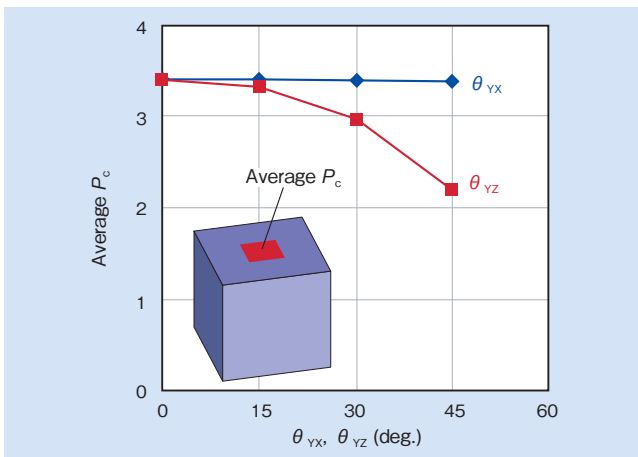


図9 θ_{vx} , θ_{vz} をそれぞれ $0 \sim 45^\circ$ で変化させたときの 1 mm 角粒子表面における平均のパーミアンス係数

Fig.9 Average permeance coefficient on the surface of a $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}$ particle when θ_{vx} and θ_{vz} are varied from 0 to 45°

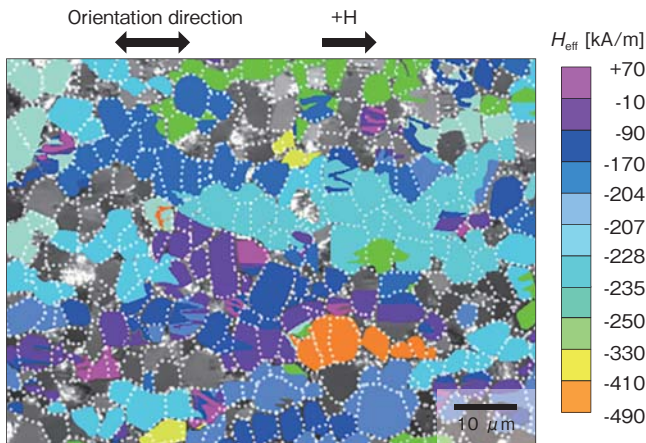


図10 Dy 未添加磁石 ($x=0$) の減磁過程において、カー顕微鏡像から抽出した各有効磁界 H_{eff} において磁化反転した領域

Fig.10 Reversed region for each value of the effective magnetic field H_{eff} extracted from the Kerr microscope image in the demagnetization process of the Dy undoped ($x=0$) magnet

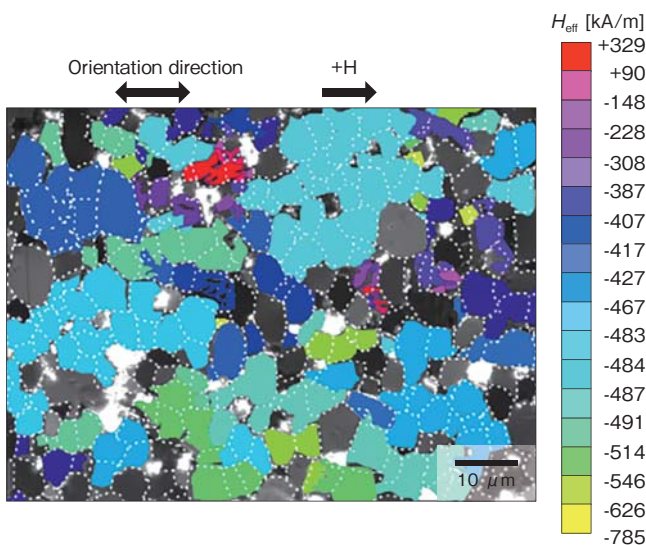


図11 Dy 添加磁石 ($x=5.0$) の減磁過程において、カー顕微鏡像から抽出した各有効磁界 H_{eff} において磁化反転した領域

Fig.11 Reversed region in each effective magnetic field H_{eff} extracted from the Kerr microscope image in the demagnetization process of the Dy doped ($x=5.0$) magnet

反転が検出されなかった領域はコントラストの変化が著しく小さかった領域であると考えられ、評価からは除外した。過去の報告¹⁸⁾と同様、磁化容易軸方向に沿って同時に複数の粒子が集団で磁化反転した。 $x=0, 5.0$ 各4視野の減磁過程における、 H_{eff} に対する未反転領域の面積割合の変化を図12に示す。 Dy 量が多く高保磁力である $x=5.0$ の表面層はより高磁界で磁化反転が進行しており、これは前節で示した結果と一致する傾向であった。

ある印加磁界において複数粒子が集団で磁化反転したとき、磁化反転が止まる位置は粒界に沿って存在することが多かった。そこで磁化反転が止まる粒界と粒子間方位差 ϕ の関係を明らかにするため、磁化反転の止まった粒界を GB_a 、磁化反転が止まらなかった粒界を GB_b とし、それぞれの粒界における ϕ を計算した。なお磁化反転が検出されなかった領域と粗大な Nd リッチ相によって明確に分断された粒界は除外した。 $x=0$ の試料において約 900 カ所の粒界を GB_a , GB_b に区分し、 ϕ の各角度範囲における GB_a , GB_b の割合を求めた結果を図13 (a) に示す。 ϕ が大きいほど GB_a の割合が大きく、磁化反転の止まる割合が大きくなることがわかった。この傾向は図13 (b) に示すように $x=5.0$ の試料において約 1,000 カ所の粒界を解析した場合にも同様であり、磁化反転の伝播の抑制に対する粒子間方位差の影響は主相粒子の飽和磁化と結晶磁気異方性が異なる場合でも同様であることを示唆している。以上より、第2章で述べたように低配向度による保磁力増加が θ 分布に対応する保磁力の角度依存性のみでは決まっていないと考え、 ϕ 分布に対応する隣接粒子間方位差の拡大による磁化反転の抑制も保磁力増加に寄与していると推察される。

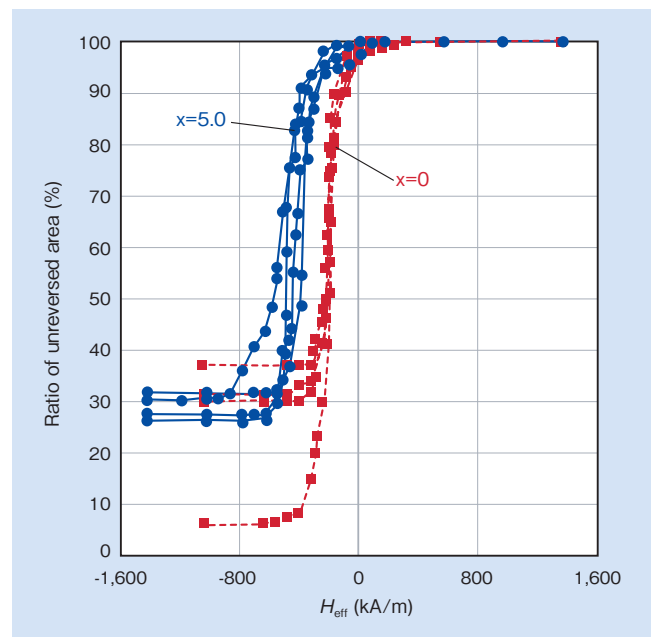


図12 カー顕微鏡像から抽出した $x=0, 5.0$ 各4視野の減磁過程における、印加磁界 H_{eff} に対する未反転領域の面積割合の変化

Fig.12 Ratio of the unreversed area vs. H_{eff} in the demagnetization process for each of the 4 views of $x=0$ and $x=5.0$ samples extracted from the Kerr microscope image

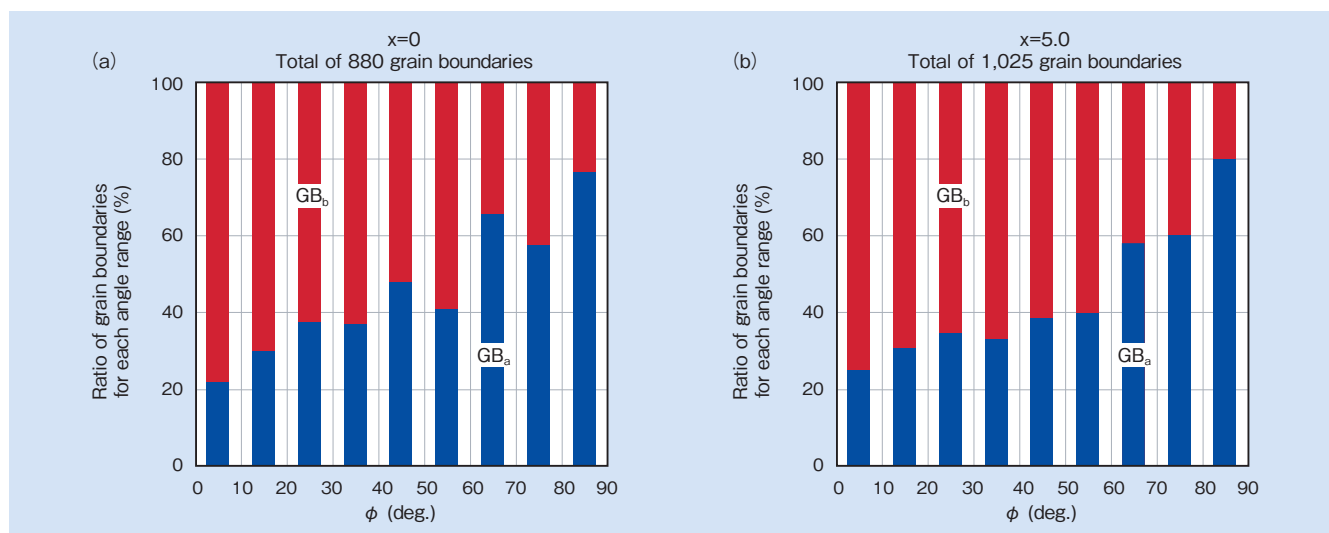


図 13 粒子間方位差 ϕ に対する GB_a , GB_b の頻度分布 (a) Dy 未添加磁石 ($x=0$) (b) Dy 添加磁石 ($x=5.0$)

Fig. 13 Ratio of GB_a and GB_b with respect to the misorientation angle of adjacent grains ϕ in (a) the Dy undoped magnet ($x=0$) and (b) the Dy doped magnet ($x=5.0$)

4. 結 言

保磁力の配向度依存性と角度依存性の違いを明らかにすることを目的とし、配向度の異なる Nd-Fe-B 系焼結磁石の結晶方位分布と減磁曲線を比較した結果、低配向度による保磁力の増加が保磁力の角度依存性のみでは説明できないことを示し、リコイルカーブ測定により低配向度磁石は減磁過程において磁壁移動が少ないことを示唆した。

また、Nd-Fe-B 系焼結磁石表面の磁区観察の有効性を明らかにするため、バルク保磁力と表面層保磁力の相関を調べた結果、バルク保磁力と表面層保磁力は比例関係にあり、焼結磁石の表面層であっても磁石内部と同様に主相の物性および粒界組織に依存して保磁力が決まっていることを示した。これを踏まえて、結晶方位解析と磁界中磁区観察を同一視野で行った結果、隣接粒子間方位差が大きいくほど磁化反転の止まる粒界の割合が大きくなっており、より大きな方位差を有する粒界が磁化反転を妨げる要因のひとつであることを示した。

以上の結果より、配向度低下による保磁力増加は、隣接粒子間の方位差が大きくなることによって粒界での磁化反転の伝播が抑制されることが寄与していると推察される。粒子間方位差が磁化反転の伝播を抑制する理由については、粒子間の磁氣的相互作用の低減や主相と粒界相との組織的關係性の変化が考えられる。Nd-Fe-B 系焼結磁石において高残留磁束密度と高保磁力を両立するには、高配向度を保ちながら磁化反転の伝播を抑制することが必要であり、粒界の組織および磁性について今後さらなる研究の進展が必要と考えられる。

本稿は、(公社)日本磁気学会の許諾の下、以下の論文誌に掲載予定の 2 編の論文からの転載である。

Journal of the Magnetics Society of Japan

(1) 著者：T. Maki, R. Ishii, M. Natsumeda, and T. Nishiuchi
 タイトル：Relationship between bulk coercivity and coercivity of surface layer in Nd-Fe-B-based sintered magnet
 発行年：2018 年予定 [42 巻 (2018) 2 号掲載予定]

(2) 著者：T. Maki, R. Uchikoshi, R. Ishii, M. Natsumeda, T. Nishiuchi, and M. Takezawa
 タイトル：Influence of misorientation angle between adjacent grains on magnetization reversal in Nd-Fe-B based sintered magnet
 発行年：2018 年予定

引用文献

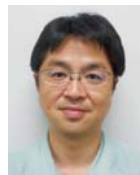
- 1) K. Hiraga, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol.24 (1985), No.1, p.L30.
- 2) R. K. Mishra, et al.: J. Appl. Phys., Vol.59 (1986), No.6, p.2244.
- 3) F. Vial, et al.: J. Magn. Magn. Mater., Vol.242-245 (2002), No.2, p.1329.
- 4) Y. Shinba, et al.: J. Appl. Phys., Vol.97 (2005), No.5, 053504.
- 5) H. Sepehri-Amin, et al.: Acta. Mater., Vol.60 (2012), No.3, p.819.
- 6) A. Handstein, et al.: J. Magn. Magn. Mater., Vol.101 (1991), No.1-3, p.382.
- 7) Y. Matsuura, et al.: J. Magn. Magn. Mater., Vol.336 (2013), p.88.
- 8) 北井, 他: 日立金属技報, Vol.30 (2014), p.20.
- 9) D. Givord, et al.: J. Magn. Magn. Mater., Vol.72 (1988), No.3, p.247.
- 10) D. Li, et al.: J. Appl. Phys. Vol.57 (1985), No.8, p.4143.
- 11) A. Fukuno, et al.: J. Appl. Phys. Vol.65 (1989), No.12, p. 4959.
- 12) Y. -G. Park, et al.: J. Magn. Magn. Mater. Vol.238 (2002), No.1, p.68.
- 13) T. Yamaoka, et al.: J. Magn. Soc. Jpn. Vol.35 (2011), No.2, p.60.
- 14) J. Thielsch, et al.: J. Appl. Phys. Vol.111 (2012), No.10, 103901.
- 15) T. Kohashi, et al.: J. Magn. Soc. Jpn. Vol.33 (2009), No.4, p.374.
- 16) H. Suzuki, et al.: J. Appl. Phys. Vol.109 (2011), No.7, 07A746.
- 17) M. Takezawa, et al.: J. Appl. Phys. Vol.101 (2007), No.9, 09K106.
- 18) M. Takezawa, et al.: IEEE Trans. Magn. Vol.49 (2013), No.7, p.3262.
- 19) M. Takezawa, et al.: J. Appl. Phys. Vol.115 (2014), No.17, 17A733.
- 20) K. Toyoki, et al.: Proceedings of the 24th International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and their Applications, (2016), p.129.
- 21) 榎, 他: 日立金属技報, Vol.24 (2007), p.34.



榎 智仁
Tomohito Maki
日立金属株式会社
磁性材料カンパニー
磁性材料研究所
博士(工学)



石井 倫太郎
Rintaro Ishii
日立金属株式会社
磁性材料カンパニー
磁性材料研究所



粟田 充俊
Mitsutoshi Natsumeda
日立金属株式会社
磁性材料カンパニー
磁性材料研究所



西内 武司
Takeshi Nishiuchi
日立金属株式会社
磁性材料カンパニー
磁性材料研究所
博士(工学)



打越 凌
Ryo Uchikoshi
九州工業大学大学院工学研究院
先端機能システム工学研究系



竹澤 昌晃
Masaaki Takezawa
九州工業大学大学院工学研究院
先端機能システム工学研究系
教授
博士(工学)