

## 内外 BM 技術動向

専務理事 大森 賢次

2014年11月3日から7日に掛けてハワイで第59回MMMが開催された。Journal of Applied Physics vol.117に論文が掲載されたのでボンド磁性材料に関係していると思われる内容を中心に紹介する。

## 硬磁性体

**東海大学(台湾)のCHANGらは**、液体急冷法で回転速度を変えて  $\text{Co}_{82-x}\text{Hf}_{12+x}\text{B}_6$  薄帯を作製した。xが0-1の場合結晶化し難く、10 m/s 回転速度でも軟磁気特性を示した。これとは対照的に、xが1.5~4の場合は、最適化された回転速度で良好な硬磁気特性を示し、 $B_r = 0.41\text{--}0.59\text{ T}$ 、 $H_c = 120\text{--}400\text{ kA/m}$ 、 $(\text{BH})_{\text{max}} = 10.6\text{--}48.1\text{ kJ/m}^3$  となった。最適な磁気特性は  $\text{Co}_{90}\text{Hf}_{14}\text{B}_6$  薄帯を30 m/sの回転速度で作製した際に得られ、 $B_r = 0.59\text{ T}$ 、 $H_c = 384\text{ kA/m}$ 、 $(\text{BH})_{\text{max}} = 48.1\text{ kJ/m}^3$  となった。XRD、TMA、TEMなどの観察結果によれば、 $\text{Co}_{82-x}\text{Hf}_{12+x}\text{B}_6$  (x = 2-4) 薄帯の良好な硬磁気特性は  $\text{Co}_{11}\text{Hf}_2$  相とCo相間の交換結合効果によるものと分かった。最適化された  $\text{Co}_{82-x}\text{Hf}_{12+x}\text{B}_6$  (x = 2-3) 薄帯は希土類やPtフリーの磁石を作製するために適していると思われる。

**長崎大学の福永らは**、Nd-Fe-B磁石の減磁過程に及ぼす  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  粒子の多接合部に存在する非磁性相の影響をマイクロマグネティックシミュレーションで調べた。非磁性相によって生まれる反磁界が逆磁区の核生成を助長するが、そのサイズは臨界値を超えたときのみ有意となる。この臨界サイズ効果は反磁界の空間分布の変化によって説明することができる。また、計算により、微細構造の微細化も保磁力を増大させることが分かった。保磁力は非磁性相が存在する反磁界の空間分布の変化に起因しており、微細構造の微細化が保磁力増加につながるメカニズムを示している。

**北京大学(中国)のXINGらは**、ストリップキャスト法で作製した  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$  合金を、予備粉砕せずに、窒化処理して  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$

の化合物を作製した。窒化処理時に  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$  合金には自発的な粉碎現象が起こる。この種の粉碎は、Smリッチな粒界相や  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$  主相のトランス粒状構造で生じる可能性がある。異方性  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{2.85}$  粉末で  $B_r = 14.1\text{ kG}$ 、 $H_c = 12.1\text{ kOe}$ 、 $(\text{BH})_{\text{max}} = 33\text{ MGOe}$  の特性を得た。

**Applied Science 大学(Germany)のBanceらは**、硬磁性相  $(\text{Dy,Nd})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  シェルの影響を評価するために  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  永久磁石のヒステリシス特性の温度依存性を、有限要素マイクロマグネティックシミュレーションを使用して計算した。シミュレーション結果は、4 nm厚さのシェルが外側の欠陥層による保磁力の低減を相殺することを示した。このシェルはNdFeB永久磁石の結晶粒界に存在することが知られている。活性化体積を計算し、構造の構成と温度に依存することを示した。

**Argonne National Laboratory(USA)のJIANGは**、円筒形や球形のソフトコア/ハードシェル交換スプリング構造の磁化反転過程を、分析的な核生成理論で調査し、数値制御によるマイクロマグネティックシミュレーションで検証した。小さなコアサイズでは、磁化反転の核生成が、磁化の横成分が方向のみ半コヒーレントになる修飾された膨らみモードで進行し、核生成磁界には、自己減磁からの寄与が含まれる。大きなコアサイズの場合には、磁化状態が渦状になる修飾カーリングモードが核生成になり易く、修飾カーリングモードになることは、磁束が閉じることで核生成磁界に影響を与えることがないため、円筒状や球状のコア/シェル交換スプリング要素を高密度にでき、高エネルギー積の可能性が提案できるとしている。

**Arlington の Texas 大学(USA)のGANGHAらは**、高い保磁力を有する単結晶  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ナノ粒子を1ステップの水熱法で調製した。20-100 nmの範囲内のナノ結晶の形状及び大きさはNaOHおよびCTABの濃度などの合成パラメータを変化させることで制御できる。XRD、ラマンスペクトル分析により、全て、合成ナノ粒子の面は立方晶のスピネル結晶構造になっていることを確認した。粒子のHRTEM観察によれば、(111)格子面の層間間隔は0.48 nmである。 $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ナノ粒子の室温特性として、保磁力5.0 kOe、飽和磁化73 emu/gが40 nmの粒子で達成できた。

**東北大学の松浦らは**、正方晶に歪んだFeCo-Ti-N系薄膜をRh(001)下地層上に作製した。膜面垂直の一軸異方性が23.5 nmの厚さの膜で観察された。このc/a格子歪みは1.08であった。異方性定数は、少なくとも  $0.57\text{ MJ/m}^3$  ( $5.7 \times 10^6\text{ erg/cm}^3$ ) と推定できる。下地層をRhとしてFeCo系合金を形成する際に、格子を歪ませるにはTiとNの添加元素の組み合わせが有効であることが分かった。

**南京大学(中国)のZHOUらは**、 $\text{CeFe}_{11-x}\text{Co}_y\text{Ti}$ の固有の磁気特性に関する最近の研究で、FeをCoで置換すると、キュリー温度Tcと飽和磁化  $4\pi M_s$  を高めながら、良好な結晶磁気異方性磁界  $H_A$  を保持できることが明らかになった。これらの知見は、Ceベースの磁石の硬磁気特性をCo置換y=1の付近で探索することでさらなる最適化ができることを保証している。 $\text{Ce}_{1+x}\text{Fe}_{11-y}\text{Co}_y\text{Ti}$ で、CeとCo両方の濃度をx=0-0.2、y=0-1.5の範囲で最適化を行った。値は、固有の磁気特性から予測されるものよりもまだ低いものの、Coの置換は効率的にすべての硬磁気特性を向上させることが分かった。特に、Tcは210℃から285-350℃、19 kOe印加時の  $4\pi M$  は8.9 kGから10.5-11.5 kG、 $B_r$  は3.1 kGから4.1-4.5 kG、 $H_c$  は1.1 kOeから1.5 kOeとなった。その結果、室温のエネルギー積は  $\text{Ce}_{1.1}\text{Fe}_{11}\text{Ti}$  で0.7 MGOeであったものが  $\text{Ce}_{1.05}\text{Fe}_{9.75}\text{Co}_{1.25}\text{Ti}$  で1.5 MGOeに100%以上増加している。顕微鏡分析によれば、Coを添加すると結晶粒径を微細化し、微細なスケールでの化学的な均質性が促進されることが分かった。微細構造におけるCoの有益な効果は硬磁気特性を向上させるために貢献している。

**Monash 大学(Malaysia)のOnalらは**、組織制御法としてECAP(Equal-channel angular pressing)を用いて液体急冷法で作製した  $\text{Nd}_{13.5}\text{Fe}_{73.8}\text{Co}_{6.7}\text{B}_{5.6}\text{Ga}_{0.4}$  合金を773 Kの温度下300 sで処理して磁気特性を調べた。試料の横断面観察によれば、事実上無制限の歪みと加工経路によるテクスチャ生成が可能になることが分かる。ECAPの出口側のマクロな組織を解析した結果、正方晶  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  結晶の基底面がせん断帯に平行に、すなわち、ECAP法により組織制御された剪断帯に対して垂直にc軸の組織形成が出来ていることが分かった。この組織制御により磁化挙動は異方性となり、残留磁化は明らかにせん断帯に垂直な方向に沿っ

て強化されている。この異方的微細構造は 773 K の比較的低い処理温度、すなわち、Nd リッチ粒界相の融点以下で実現される。したがって、低い処理温度の結果として、液体急冷法で作製したナノ構造は、従来のダイアップセットした後で得られた典型的な粒子サイズよりもかなり小さく、約 20 ~ 30 nm となる。ECAP 法を使うことで異方性ナノ構造を有する異方性磁石が実現できる可能性がある。

**長崎大学の筋内らは**、Ta 基板上に直流電気メッキで Fe-Pt の厚膜を作製し、膜の磁気特性を評価した。3 ~ 23 μm 厚さの Fe-Pt 膜が 2 から 20 分のめっき時間で得られた。メッキした Fe-Pt 膜は歪んだ fcc 構造を有し、低保磁力であった。この膜を 700 °C で 60 分間熱処理した結果、相転移が起こり、fct となり、結果的に 700 kA/m の高保磁力を有する Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub> となった。高保磁力は幅広い厚さの範囲で得られた。Fe-Pt 膜は魅力的な厚膜磁石の一つである。

**静岡理工科大学の小林らは**、Nd-Fe-B 系焼結磁石の c 面と ab 面の表面層を機械的に研磨することで磁化および減磁のメカニズムを検討した。全試料の振動試料型磁力計による測定結果と表面層の磁区構造を磁気力顕微鏡を用いて観察した結果で、表面層と磁石の内部との間の磁氣的相互作用を明らかにした。焼結磁石の表面層の結晶粒から、僅か約 2nm 厚さの Nd リッチ粒界相を研磨により除去した。a-b 面を研磨した場合、約 55 ミクロンの厚さの板状のサンプルではあるが、a-b 面の表面層で独立した磁化反転が起こることが分かった。この表面層の保磁力は 0.3T 未満であった。これとは対照的に、c 面を研磨した場合には、バルク試料の保磁力が明確に減少したにもかかわらず、c 面の表面層では独立した磁化反転は起こらなかった。表面層の粒子は、磁気ユニットとして、クラスターの形状に依存する減磁要因となるクラスタを形成している。表面層結晶粒間の磁氣的相互作用は、Nd-Fe-B 系焼結磁石の保磁力機構において重要な役割を果たしていることが期待できる。

## 軟磁性材料

**Northwestern University (USA) の KNIPLING らは**、ナノ結晶材 Fe<sub>88-2x</sub>Co<sub>x</sub>Ni<sub>x</sub>Zr<sub>7</sub>B<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub> (x=0-22) の磁気特性を調べた。x を増大させると磁化は減少し、保磁力は増大するが、キュリー温度は著しく増大する (x=0 で 73 °C、x=22 で 570 °C)。最適な組成は x=5.5 で

300-500 °C で優れた軟磁気特性を示す。Fe 基の合金に比べて高い磁化とキュリー温度を有し、(Fe,Co) 基の合金に比べて少ない Co 量であり、高温での軟磁性材料として魅力的である。

**Darmstadt 工科大学 (Germany) の DIRBA らは**、MgO(100) 基板に α-Fe と α'-Fe<sub>8</sub>N<sub>x</sub> 薄膜を RF マグネトロンスパッタ法で形成した。窒素を徐々に増加することで Fe の bcc のユニットセルが [001] 方向に伸びて α'-Fe<sub>8</sub>N となった際には約 10 % 正方歪みを起こした。その結果 Fe 原子のボーア磁子数は 2.61 ± 0.06 となり、異方性が著しく増大した。このことは特別な窒素原子の秩序は不要で、格子の膨張が α'-Fe<sub>8</sub>N の磁気モーメント増大の起源であるということを示している。

**Seville 大学 (SPAIN) の BLAZQUEZ らは**、Hitperm 型の急冷薄帯 (Fe<sub>39</sub>Co<sub>39</sub>Nb<sub>6</sub>B<sub>15</sub>Cu<sub>1</sub>) の長手方向に磁界を掛けて熱処理した結果、磁気異方性が減少し保磁力は 3 A/m となった。Nb 添加の Hitperm に Cu を添加することで微細組織を細かくしたことが低保磁力化のキー要因である。横手方向に磁界を掛けて熱処理した場合は、履歴曲線がシェアーされたものとなり高周波でのセンサーなどに適したものとなる。

**華中科技大学 (中国) の PENG らは**、Ba(CoTi)<sub>1.2</sub>Fe<sub>9.6</sub>O<sub>19</sub> と BiFeO<sub>3</sub> の複合フェライトで透磁率、誘電率、および高周波ロスを 10 MHz-1 GHz の周波数帯域で調べた。BFO の割合によって 300 MHz の周波数で透磁率 10.86、磁氣的ロスは <0.128 となった。BFO を 2.7 vol% から 12.6 vol% に増加すると磁氣的ロスは 32 % 減少した。高効率アンテナの小型化に使える可能性が高い。

**忠北大学校 (Korea) の CHO らは**、グリッド型のマイクロ波吸収体を Ag をコートした Ni-Zn フェライト粉をゴムに含ませて作製した。高誘電体に空隙を規則的に付けることでマイクロ波吸収特性を改善した。空隙は誘電率と透磁率を低下させ、高周波数でのインピーダンスマッチングが可能となる。最適な空隙の割合で 2 mm 厚さの試料で 10.5 GHz での反射ロスを -30 dB まで低下出来る。グリッド型のマイクロ波吸収体は従来のフェライト複合吸収体に比べてインピーダンスマッチングさせるための厚さが薄く、かつ、かなり軽減できることが利点である。

**大同大学の神保らは**、CoFeSiB 非晶質薄

膜の熱安定性が改善できれば、グラニューラーインギャブセンサーのヨークとして優れた軟磁気特性が使えると考え、比較的原子半径が大きい Ta や Hf を添加することが熱安定性を改善する手立てであるとしている。(CoFeSiB)<sub>96.2</sub>Hf<sub>3.8</sub> 非晶質薄膜は 623 K で熱処理した結果 0.2 Oe の低保磁力を僅かな磁化の減少で得た。673 K で (CoFeSiB)<sub>93.0</sub>Hf<sub>7.0</sub> 非晶質薄膜を熱処理しても約 0.5 Oe の低保磁力が得られた。

**東北大学の松浦らは**、NANOMET (Fe<sub>85.2</sub>Si<sub>1</sub>B<sub>9</sub>P<sub>4</sub>Cu<sub>0.8</sub>) や FINEMET (Fe<sub>73.5</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub>) で、析出する bcc-Fe(Si) の結晶粒径を小さくするために重要な Cu について調べた。NANOMET は FINEMET に比べて Fe を多く含み、かつ、FINEMET の Nb の代わりに P を含む。XAFS で調べた結果、FINEMET では Cu クラスターの fcc 構造が急冷後に出来ており、450 °C まで安定であり、それ以上の温度で急激に成長する。それに反して、NANOMET では Cu の周りの局所構造が非晶質 → fcc → bcc → fcc と熱処理で変化する。これらは bcc-Fe が析出する際に Cu クラスターの役割が異なることを意味している。NANOMET で生じる極めて早い異常な熱の解放を伴う結晶化過程は Cu が fcc から bcc に遷移する別の理由である。

**長崎大学の渡辺らは**、めっきプロセスの電流効率に着目してクエン酸系のめっき浴で鉄ニッケル膜を作製した。約 22 at% の Fe 含有量を有するフィルムは、めっき浴中の硫酸鉄の含有量を調整することにより得られた。低保磁力 (<30 A/m) の Fe-Ni 系フィルムを種々のクエン酸含量の浴中で得られることを見出した。電流効率が良いため低クエン酸含量の浴が高効率を得るために有効であることを見出した。10 g/L のクエン酸含量を有する浴は、高電流効率 (85 %) を示し、高効率、めっき速度の増大が可能となった。最大めっき速度は、186 μm/h であった。以前の研究に比較して 1.3 倍の効率が得られ、低クエン酸含量を有する浴は、短時間で厚い鉄ニッケル膜を得るための適切なめっき浴であると結論づけた。

**北京工科大学 (中国) の WANG らは**、3 種類のスピネルフェライトナノ結晶、MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M = Co と Ni 及び Mn) をコロイドミルと水熱法で合成した。コロイドミル中で水素化ホウ素ナトリウム (NaBH<sub>4</sub>) による陽イオンの迅速な混合と還元を生じさせ、水熱反応で緩やかな酸化とスピネルフェライトナノ結晶への構造転換が起こ

す。相の純度及び結晶格子パラメータは、XRD によって推定した。SEM および TEM 像で合成フェライトナノ結晶の形態及び粒子サイズを見た。ラマンスペクトルでは、室温でのアクティブフォノンモードにシフトが見られ、四面体と八面体サイトに陽イオンの再分配が起こっていることが分かった。磁気測定で全ての得られたサンプルが高飽和磁化を示した。また、水熱反応時間が微細構造、形態、および、合成フェライトナノ結晶の磁気特性に大きな影響を持つことが実証された。

**東北大学の遠藤らは**、250 nm の厚さの  $\text{Co}_{85-(x+y)}\text{Zr}_{3+x}\text{Nb}_{12+y}$  ( $x: 0-5.5, y: 0-11.0$ ) の非晶質薄膜の高周波磁気特性を Zr(x) と Nb(y) の関数として検討した。x と y 両者は高周波磁気特性に影響する。x<3.0 と y<5.0 の場合には、それぞれの透磁率スペクトルが見られるが、x と y を増加させると強磁性共鳴周波数は 120 GHz から 0.41 GHz に低下し、減衰定数は 0.15 から 0.43 に増大する。共鳴 (FMR) 周波数が低下し、0.15 から 0.43 に一定の減衰効果的に増加させる。x=3.0, y=8.2 の場合には、透磁率スペクトルは消えてしまい、効果的な減衰定数は約 0.82 となる。対照的に、x=5.5, y=11.0 では高周波磁気特性は得られない。したがって、適切に Zr 及び Nb の濃度の両方を選択することが高周波磁気特性を制御する効果的な方法です。この発見は、新しい薄膜の微細な電磁両立性 (EMC) のようなアプリケーションでは、ここで適切に透過性を調整し、FMR プロファイルの観点から関心を持たれるべきものであることは非常に重要である。

**南京理工大学 (中国) の XU らは**、マイクロ波磁化ダイナミクスの減衰を高めるために、CoZr 薄膜の Nd 添加効果 (0 ~ 3.0 at%) を調べた。飽和磁化は、Nd を添加すると減少する。保磁力は、1.5 at% 添加では減少するが 3.0 at% 添加では増大する。磁化ダイナミクスは、マイクロ波帯での強磁性共鳴の動作によって決定される透磁率スペクトルで特徴づけられる。透磁率スペクトルは、ランダウ・リフシッツ・ギルバート式に合わせて分析される。その結果、Nd 添加によりスピン・軌道カップリングが強化されたため、動的な異方性磁界と減衰係数が増加することが分かった。

**South Florida 大学 (USA) の KHURSHID らは**、球状および立方状の交換結合した  $\text{FeO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$  ナノ粒子を加熱効率の異方性を目安にして熱分解法で作製した。XRD およ

び TEM によりナノ粒子は約 20 nm の平均粒径であり、 $\text{FeO}$  と  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の相で構成されている。磁気測定と横磁化率測定によれば、飽和磁化は立方体に比べて球状が 1.5 倍であるが、実効的な異方性磁界は、球状に比べて立方体が 1.5 倍である。ハイパーサーミア実験によれば比吸収率は 310 kHz で 600 Oe の下で、立方体と球状でそれぞれ 200 と 135 W/g であった。飽和磁化が磁性ナノ粒子の比吸収率および加熱効率の唯一の要因ではなく、その実効的な異方性を調整することによって改善することができることが示された。

**Carnegie Mellon 大学 (USA) の LEARY らは**、軟磁性材料に磁気異方性付与する処理技術は透磁率と損失を制御する周知の方法である。ナノ複合材料をキュリー温度以下で磁場中熱処理することで約  $2 \text{ kJ/m}^3$  の一軸異方性エネルギーを実現した。Fe-Si 組成を応力下で熱処理すると、非晶質中で bcc に残留歪みが生じるため、約  $10 \text{ kJ/m}^3$  の高い異方性エネルギーを付与することができる。零磁歪の  $\text{Co}_{80-x}\text{Fe}_x\text{Mn}_y\text{Nb}_4\text{B}_4\text{Si}_2$  軟磁性ナノコンポジット材で説明されている。ここで、x と y は 8 at% 以下であり、最密な結晶の場合、約  $50 \text{ kJ/m}^3$  まで異方性を誘導出来、機械的特性の向上も出来る。XRD を使った差分パターンによれば応力軸に対してアフィン歪みの証拠が見られる。

**Applied Sciences 大学 (Germany) の Topfer らは**、Mn-Zn 系フェライトをシュウ酸系の湿式化学合成法で調製した。50 nm の粒径を有するナノ結晶フェライト粉末を CaO 500 ppm、SiO<sub>2</sub> 100 ppm を標準添加剤として 1150 °C で焼結することで得た。4-5 μm の粒径を有するきめの細かい、緻密な微細構造が得られた。Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、ZrO<sub>2</sub>、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、および SnO<sub>2</sub> を同時添加すると、電力損失が  $65 \text{ mW/cm}^3$  (500 kHz, 50 mT, 80 °C)、 $55 \text{ mW/cm}^3$  (1 MHz, 25 mT, 80 °C) と低下した。ロス解析により渦電流および残留損失が絶縁粒界相の形成を介して最小化されたことが TEM によって確認された。酸化スズの添加は、第一鉄イオン濃度が増加し、透磁率測定値  $\mu$  (T) に反映されるように異方性に影響を与える。

**Iowa 州立大学 (USA) の Nlebedim らは**、チタンで修飾したコバルトフェライトの磁気特性の温度依存性を示した。任意の 2 温度間で  $H \approx 2.4 \text{ MA/m}$  の時に得られた最大磁化の変化は組成によってシステムチック

に増加する。結晶磁気異方性と保磁力の変化は、陽イオン置換コバルトフェライトの以前の研究とは異なっていた。低い濃度では、より低い熱エネルギーの効果が、異方性を制御する際に非磁性のカチオン置換の効果を支配する。高濃度の場合には逆になる。保磁力の温度依存性は、結晶磁気異方性の寄与が支配的であり、保磁力の組成依存性は磁壁のピニングを介した微細構造の寄与が支配的である。

**Wright-Patterson AFB(USA) の TURGUT らは**、鉄系の Metglas テープのコア、センダスト粉のコア、及び Mn-Zn 系フェライトコアを用い、空隙の有無で、直流バイアス下のヒステリシス損失特性を検討した。外部バイアス磁界の関数として、固定外部磁場  $H_{ext}$ 、固定磁束変化 ( $\Delta B$ )、固定最大順方向磁化 ( $B_{max}$ ) を測定した。全ての測定で、直流バイアス磁界の関数としての透磁率と損失間に直接相関が見出された。ヒステリシス損失の増大は、古典的なドメイン理論が最小の損失を予測する磁化回転域で見られた。

**新日鐵住金の岩田らは**、Fe-Si (110) 鋼にレーザー照射して閉鎖ドメインを生成する内部応力分布を高エネルギー X 線分析や変分原理に基づくドメイン理論を用いて調べた。試料内部で測定された三軸応力は圧縮であり、圧延方向の応力は、他の方向の応力よりも支配的であった。閉鎖ドメインの磁気エネルギーの変分原理に基づく計算によれば、測定した三軸応力は閉鎖ドメインなしの基本的なドメインよりもより安定した閉鎖ドメインを生成することが明らかになった。実験と計算結果は、レーザーによってできた内部応力が閉鎖ドメインの発生につながるということが分かった。

**天津大学 (中国) の LIU らは**、ナノ結晶 ( $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ )<sub>73.5</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub> の軟磁気特性への磁場中熱処理効果を調べた。磁場なしで熱処理したのとは対照的に、磁場中熱処理は明らかに飽和磁歪  $\lambda_s$  を低減し、実効的な磁気異方性  $\langle K \rangle$  を増加させる。さらに、実験サンプルの初透磁率  $\mu_i$  は、磁場中熱処理で顕著に向上する。異なる磁場中熱処理で  $\lambda_s$  と  $\langle K \rangle$  に違いが起こり、 $\mu_i$  への影響の度合いが変わる。3 通りの磁場中熱処理で磁場によるナノ結晶状態は、他の二つの磁場中熱処理に比較してより実行的な磁場効果を発揮し、より優れた軟磁気特性を実現することができる。その理由を分析した。