

内外BM技術動向

JABM 副会長
諏訪部 繁和

2025年10月27日～31日の間、米国フロリダ州パームビーチでThe 70th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2025 Conference)が開催された。磁気・磁性材料に関する基礎から応用までの研究成果について、約500件の口頭発表と約180件のポスター発表が行われた。硬質磁性材料、軟質磁性材料に関連する発表は各々40件あまりであったが、Nd-Fe-B焼結磁石に関する発表は、もはやほとんどない状況である。Abstractの中から、筆者が興味をもった発表について紹介する。

【Nd-Fe-B磁石】

Correlation of Coercivity, Microstructure, and Surface Defects in HDDR-Processed Nd-Fe-B Powders for Bonded Magnet Applications (X. Liu⁵, Ames National Laboratory, USA)

HDDR(hydrogen disproportionation desorption recombination)は、ボンド磁石で使用するために、Nd-Fe-B合金またはリサイクルされたNd-Fe-B磁石から高保磁力の異方性粉末を生成する効果的な方法である。

HDDR処理済みのNd-Fe-Bの保磁力と角形性は、粒子サイズの減少とともに減少する。微細構造の観察により、粒子表面からのNd₂Fe₁₄B結晶粒の剥離とNdリッチな粒界相の欠如が明らかになった。微小磁気シミュレーションでは、減磁はこれらの欠陥が最も集中している粒子表面から始まり、これにより磁化曲線の保磁力と角形性が減少することがわかった。より小さなHDDR粒子の減磁曲線の角形性、屈曲点、保磁力の減少は、比表面積の増加に起因し、核生成が減少し、磁化反転時に磁壁のピンニング場が弱まることが要因である。HDDR Nd-Fe-B材料の性能を向上させるための一つの方策として、微細粒子の割合を低減(<35 μ m)し、粒子表面の2:14:1結晶粒を取り囲むNdリッチ結晶粒界相の形成を促進することが挙げられる。

Dy-Free Sintered Nd-Fe-B Magnets Enhanced by Pr Al-Cu Alloy via Different Grain Boundary Engineering Techniques. (W. Tang⁵, Ames National Laboratory, USA)

Pr-Al-Cu合金を粒界拡散(Grain Boundary Diffusion; GBD)材料として用い、Nd-Fe-B合金粉末とのブレンド法および表面拡散法を用いてNd-Fe-B焼結磁石に拡散させた。ブレンド法で

は、Pr-Al-Cuの含有量を増やすことで保磁力(H_c)が増加し、残留磁束密度(B_r)と最大エネルギー積(BH)_{max}は減少した。 H_c と(BH)_{max}の最良の組み合わせは7.5wt.%のPr-Al-Cuであった。一方、表面拡散法では、1.5 wt.% Pr-Al-Cuで、ブレンド法の10 wt.% Pr-Al-Cu拡散磁石(H_c =19.2 kOe)を上回る21.3 kOeの高 H_c を持つ磁石が得られた。しかし、表面拡散磁石は減磁曲線の角形性が悪いいため、(BH)_{max}(33.1 MGOe)が低下した。

Tailoring Nd-Fe-B Microstructure via LPBF like Cooling in Melt Spinning (A. Paul⁵, University of Nebraska Lincoln, USA)

Nd-Fe-Bのような永久磁石のアディティブ・マニファクチャリング(AM)は、後処理を最小限に抑え、材料損失も低く、複雑でネット状の磁性部品を開発する機会を提供する。レーザー粉末床溶融結合(laser powder bed fusion; LPBF)に固有の複雑な凝固性は、LPBFと互換性のある新しい合金組成の開発を必要としており、層ごとのレーザー融解時の熱環境を模倣した代替プロセスを用いた高スループット合金開発が不可欠である。メルトスピニング(液体急冷)はLPBFに似た高い冷却速度と指向性のある熱流を提供するが、Cuホイールを用いた従来の方式(熱伝導率 \sim 400 W/mK)はLPBFに比べて冷却速度が大きすぎる。そこで、Nd-Fe-B合金の熱伝導率(約16 W/mK)に近いステンレススチール(SS 304)ホイールを用いて最適化し、LPBFでの凝固挙動をより良く再現した。冷却速度の違いを理解し定量化するために、2次元過渡熱流シミュレーションを実施した結果、SS(304)はロール速度20 m/s、Cuは10 m/sでそれぞれ \sim 3 \times 10⁵ K/sの冷却速度となった。これを実験的に検証するため、最適化された三元合金Nd₁₈Fe_{74.5}B_{7.5}を両方のホイールを用い10 m/sで液体急冷した。磁気測定では、Cuに対して18.8 kOe、SSで18.3 kOeと同等の保磁力が得られ、ほぼ同一の微細構造を確認し、シミュレーションを検証した。

同じ合金を用いSSロールで冷却速度に対する感度を1m/sのステップで調べた結果、保磁力は12 m/sで18 kOe、9 m/sで11.6 kOeと低下した。これらの検討は、LPBF用のNd-Fe-B合金の設計において有用である。

Critical Rare Earth Lean Nd-Ce-Fe-B Permanent Magnets Powder via Wet Chemical Process (H. Parmar⁵, Ames National Laboratory, USA)

理論的に、CeをNdまたはPrで部分的に置換することでCe-Fe-Bの磁気特性が改善でき、さらに、計算によりナノスケール粒子でも磁気特性が改善されることを示した。従来の焼結技術では、理想的なナノ構造を作製することができないため、化学合成などのボトムアップ合成技術は、ナノ構造を作製するための有望なアプローチである。本研究では、化学合成プロセスを用いて希土類-鉄-ホウ素酸化物を作製し、その後、カルシウムを還元剤として還元拡散反応を行った。その結果、様々なNd含有量を持つCe-Nd-Fe-Bナノ粒子の作製に成功し、Nd含有量が0%から100%に増加すると、典型的な保磁力は0.7 kOeから9.1 kOeへと大幅に増加した。

BM インフォメーション

(Nd,Ce)-Fe-B core-shell magnet simulation using mumax3 software

(C. Li⁵, Inner Mongolia University of Science and Technology, 中国)

本研究では、mumax3ソフトウェアを用いて、

① コア(Ce₂Fe₁₄B)-遷移層((Nd_{0.7}Ce_{0.3})₂Fe₁₄B)-シェル(Nd₂Fe₁₄B)と

② コア(Nd₂Fe₁₄B)-遷移層((Nd_{0.7}Ce_{0.3})₂Fe₁₄B)-シェル(Ce₂Fe₁₄B)

の2種類のコア-シェル(三層入れ子)モデルについて、遷移層の厚さが磁気特性および磁気モーメント分布に与える影響が調べた。シミュレーション結果は、遷移層の厚さが増えるにつれて、両モデルの粒子の保磁力が減少することを示した。これは粒子の平均的な結晶磁気異方性磁界と総減磁エネルギーの複合効果の結果である。両粒子の残留磁化と最大エネルギー積は、NdおよびCeの含有量の変化に関連し、①の方が優れた磁気特性を示した。66 kOeの外部磁界下ではNd₂Fe₁₄Bの磁気モーメントがまず偏向し、(Nd_{0.7}Ce_{0.3})₂Fe₁₄BおよびCe₂Fe₁₄Bの磁気モーメントは偏向しないことがわかった。

【Sm-Co磁石】

Investigation on magnetic properties of anisotropic nanocrystalline Sm-Co-Cu magnets (K. Park, 平山⁵, 産総研, 日本)

先行研究では、誘導熱プラズマ(ITP)プロセスにより合成したSm-Co合金ナノ粉末から、5 Tという巨大な保磁力を持つ等方性ナノ結晶Sm-Co磁石の固結に成功した。X線回折(XRD)分析により、このSm-Coナノ粉末には高い異方性磁界を持つSmCo₅相が36 wt%含有されていることが明らかになっている。

本研究では、SmCo₅相含有量を増やし、より硬磁性のナノ粉末を得るためCuをドーブした。Sm-Co合金系へのCu添加は固相線温度を低下させ、相分離なしに狭い組成範囲内で相形成を促進する。Sm-Co-Cuナノ粉末は、Sm:Co:Cu = 1:4.75:0.25の原子比で混合した原料粉末を用い、ITP法により作製した。XRD分析により、Sm-Co-Cuナノ粉末には約60 wt%のSmCo₅相が含まれており、これはCuを含まないSm-Coナノ粉末の約1.6倍の高含有率であることが明らかになった。異方性Sm-Co-Cuバルク磁石では、CuをドーブしていないSm-Co磁石と比較して、SmCo₅相の結晶学的配向性が向上していることが示された。XRD極図測定に基づく異方性Sm-Co-Cu磁石の配向度は約87%と推定された。さらに、Sm-Co-Cu磁石はSm-Co磁石と比較して、1.6 Tの保磁力向上と異方的な磁気特性を示した。

【Sm-Fe-N / Sm-Fe-M磁石】

Improvement of Thermal Stability of TbCu₇ Sm-Fe phase by Addition of Zr and Y in Synthesis of the Fine Powder with Low-temperature Reduction-Diffusion (岡田, 産総研, 日本)

TbCu₇型Sm-Fe-Nは飽和磁化(1.7 T)が高いことから魅力的な材料である。しかし、準安定相であるため、その合成プロセスは現在非平衡プロセスに限定されており、等方性粉末しか得られていない。異方性TbCu₇型粉末を合成するため、還元拡散(R-D)プロ

セスに着目して、Caを溶解するLiCl溶融塩を添加することで、R-D温度を約600°Cまで低下させることに成功し、TbCu₇型Sm-Fe-N異方性粉末の合成を実現した。しかしながら、R-D温度が低いため粒子成長が不十分で、形成された粒子は主に凝集しており、推定されるFe/Sm比は約8.5で、高い飽和磁化を達成するには不十分であった。

これらの課題に対処するため、本研究では準安定相を安定化させFe/Sm比を増加させる有望な元素であるZrとYの添加効果を検討した。選定した元素の硝酸塩の水溶液を調製し、スプレー熱分解法により酸化物粉末を合成した。酸化物粉末を水素で還元後、CaおよびLiClと混合し、R-D処理を施した。水洗浄および脱水素処理後、XRD測定により試料を評価した。添加元素が存在しない場合、R-D温度650°CでTh₂Zn₁₇相に対応するピークが出現し始め、c/a値が減少する。一方、ZrまたはY添加剤が存在する場合、750°CでもXRDパターンやc/a値においてTh₂Zn₁₇相の形成は観察されなかった。さらに、Zr添加時には顕著なc/a値の増加が認められた。還元拡散法においても、ZrおよびYの添加がTbCu₇相の安定化と鉄濃度増加に寄与することが判明した。

High coercivity TbCu₇-type Sm-Fe-N powder prepared by induction thermal plasma process (平山⁵, 産総研, 日本)

TbCu₇型SmFeの異方性粉末は、低温還元拡散法および熱プラズマ法により合成されているが、Nd₂Fe₁₄Bを超える極めて高い固有特性を有するFe/Sm=8.5以上のFeリッチなTbCu₇型Sm-Feの合成には成功していない。

本研究では、SmをYで置換することによりFeリッチなTbCu₇型Sm-Feの合成を試み、IPA中での15時間のボールミル処理により、D₉₉粒子径10μm以下のSm-Y微粉末を得た。さらに、Sm金属を550°Cで水素化後、ジェットミル処理することでD₉₉=2.7μmのSm-H微粉末を得た。Fe、Sm-Y、Sm-Hの混合粉末(原子比Sm:Y:Fe = 0.7:0.3:3)を熱プラズマプロセスの原料粉末として使用し、熱プラズマで得られたナノ粉末を700°Cで3時間、10時間、48時間焼成した。その後、窒化処理を窒素雰囲気下で400°C、30分間実施した。熱プラズマ法で得られたSm-Y-Fe粉末の平均粒子径は94 nmであり、XRDプロファイルは、窒化処理後にTbCu₇構造由来の全ピークが低角度側にシフトしたことを示し、窒素導入による体積膨張を確認した。ピーク位置は、Fe/Sm(原子%)比が8.5を超えることを示唆し、FeリッチなSm-Fe-Nの合成に成功したことを示した。保磁力(H_c)は、焼成時間を3時間から48時間に増加させるにつれて、0.6から1.8 MA/mに増加した。この1.8MA/mはTbCu₇型Sm-Fe-N化合物における最高保磁力であり、SmをYで置換することで誘導熱プラズマ法を用いたFeリッチなTbCu₇型Sm-Fe-Nナノ粉末の製造が可能であることを実証した。

Iron Nitride Based Nanocomposite Magnet and its Prototype Motor Application (小川⁵, 東北大学, 日本)

準安定な窒化鉄ナノ粒子(α -Fe₁₆N₂など)は、高い飽和磁化(約2.2 T)とセミアード的な結晶磁気異方性定数(約1×10⁶ J/m³)を示す。Sm-Fe-N相などの従来の永久磁石粉末と組み合わせたSm-Fe-N/Fe₁₆N₂ナノコンポジットボンド磁石は、磁化反転とヒス

テリス曲線の滑らかさを同時に示し、従来観察される独立した反転挙動とは対照的である。この挙動により、混合比率の関数として中間磁気特性を連続的に調整することが可能となる。現在、Sm-Fe-N粉末に対する Fe_{16}N_2 粉末の混合比率及び磁石粉末への添加量を最適化することにより、最大残留磁化0.71 T、保磁力380 kA/mを達成している。また、このプロセスにより製造した異方性Sm-Fe-N/ Fe_{16}N_2 磁石を用いた従来の4極表面実装型永久磁石同期電動機(PMSM)の実験的実証を行い、160 mN・mのトルクにおいて89.3%という高い効率を達成し、三次元有限要素法シミュレーション(3D-FEM)による予測結果とよく一致した。

Chemical bond and phase stability of Ga-doped $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_x$ Magnet

(X. Liu⁵, Ames National Laboratory, USA)

Nd-Fe-Bの代替として、菱面体 $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ 型構造を持つ金属間化合物 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{X}_3$ ($\text{X}=\text{C}$ および N)は、優れた硬磁性を示す。 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ は準安定で650°C未満の温度で分解するが、 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_x$ は $x < 1.0$ でアーク融解によって作製可能である。Al、Si、Gaなどの添加元素により、アーク融解された $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_x$ 合金の2:17単相形成が可能(x の最大値は3)となり、真空融解や焼結などの高温プロセスを用いて、完全に高密度のバルク $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_x$ 磁石を作製できる可能性がある。

本研究では $\text{Sm}_2(\text{Fe},\text{Ga})_{17}\text{C}_3$ の相安定性向上にこれらの添加元素が寄与する要因を特定するために、電子構造計算と化学結合解析を実施した。電子構造計算結果から、Ga原子は $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_3$ および $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ において、結晶学的サイト9dと18hでFeを部分的に置き換えることを好むことがわかった。このGaの優先置換は、GaがSm-Ga結合形成を促進しつつ、Ga-C相互作用を避けることに起因する。Gaは $\text{Sm}_2(\text{Fe},\text{Ga})_{17}\text{C}_3$ でより多くの負の形成エネルギーをもたらす、より安定した2:17構造をもたらす。Crystal Orbital Hamilton Populations (COHP)の計算では、C挿入が $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_3$ におけるSm-Fe(18h)とSm-Fe(18f)の結合を弱めることが明らかになっており、これに対してGaは化学結合間の電子再分布を誘導し、Sm-Fe(18h)およびSm-Fe(18f)の結合強度を高めつつ、C-Sm結合の強度をわずかに低下させ、 $\text{Sm}_2(\text{Fe},\text{Ga})_{17}\text{C}_3$ の相安定性の向上に寄与することがわかった。この結果は、Ga添加が $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_3$ の相安定性を高め、新規磁石開発の有望なアプローチとなることを示唆している。

Exploring stable sites and compositional ranges in $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{M}_x$ ($\text{M} = \text{H}, \text{C}, \text{N}$) using neural network potentials (立津, 名桜大学, 日本)

本研究では、強力な永久磁石材料として有望な $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{M}_x$ ($\text{M} = \text{H}, \text{C}, \text{N}; x = 0-10$)の安定構造と組成限界を体系的に調査した。本研究では、ニューラルネットワークポテンシャルに基づく計算ツールであるCHGNetとMatlantisを、ATAT(Alloy Theoretic Automated Toolkit)のクラスター展開法と組み合わせて利用した。このアプローチにより、M原子の様々な濃度範囲にわたる安定な占有サイトを特定し、元素添加が材料の安定性に及ぼす影響に関する理解を深めることができた。

具体的には、 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ ホスト格子内のH、C、N原子について、各種濃度における安定占有サイト(報告されている3b、9e、18g

ワイク位置)を徹底的に調査した。CHGNetとMatlantisでは絶対エネルギー値に差異があるものの、両手法とも定性的な傾向予測において良好な一致を示した。他のサイトで見られる一般的な傾向とは対照的に、9eサイトへのM原子添加は、調査した全M元素において最も安定した形成エネルギーをもたらす傾向がある。

$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ については、本計算により窒素添加の最適範囲は $x \approx 3$ までと示唆される。この結果は、 $x \approx 3$ を超えても $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 構造が維持されることを示す実験報告と良好に一致し、窒素添加に関する実験結果を本計算が効果的に説明していることを実証している。各元素の導入が構造安定性に及ぼす影響を解明し、安定に組み込める最大濃度を定義するため、濃度関数としてのエネルギー傾向を分析した。これらの知見は $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{M}_x$ 系における高性能磁性材料設計のための重要な基礎情報を提供する。

Hard magnetic properties of Sm-Fe-Ga-C melt-spun ribbons with SmFe_5 phase

(齋藤⁵, 千葉工大, 日本)

液体急冷法にて SmFe_5 、 SmFe_5C 、 SmFe_5Ga 、 SmFe_5GaC 合金の薄帯を作製し、973~1173 Kアルゴン雰囲気中での熱処理後の磁気特性、特に保磁力を調査した。急冷後の状態では、非晶質のSm-Fe薄帯は低保磁力を示した。熱処理後、 SmFe_5 の薄帯は主に SmFe_5 相で構成され、 SmFe_5C 薄帯には少量の SmFe_5 相と α -Fe相が含まれた。これらの薄帯では保磁力が低かった。一方、 SmFe_5Ga および SmFe_5GaC の薄帯は $\text{Sm}(\text{Fe},\text{Ga})_5$ 相を示した。 SmFe_5Ga および SmFe_5GaC の薄帯は、1073Kで熱処理後、それぞれ1.12 kOeと12.2 kOeの保磁力を示した。微細構造は、保磁力が低い SmFe_5Ga は、保磁力が高い SmFe_5GaC 試料よりも粒径が小さいことが明らかになった。さらに、 SmFe_5GaC 試料の $\text{Sm}(\text{Fe},\text{Ga})_5$ 相は SmFe_5Ga 試料よりもキュリー温度が高いことがわかった。これは、 SmFe_5GaC 試料の $\text{Sm}(\text{Fe},\text{Ga})_5$ 相が $\text{Sm}(\text{Fe},\text{Ga})_5$ 相のカーバイドであり得ることを示唆している。

First-Principles Prediction of Permanent Magnetism in $\text{SmFe}_{11}\text{Ti}$

(B. Narangerel⁵, Incheon National University, 韓国)

SmFe_{12} は優れた永久磁石としての磁気特性を有するものの、その構造的不安定性が実用化を制限している。Tiの存在は $\text{SmFe}_{11}\text{Ti}$ 相を安定化させるが、磁気特性を急速に劣化させる。

体系的な密度汎関数理論、密度汎関数摂動法、モンテカルロ法、および微小磁気シミュレーションを用いて、構造安定性を損なうことなく $\text{SmFe}_{11}\text{Ti}$ 相の本質的な磁気特性を改善できる金属元素によるTiの部分置換を検討した。計算結果から、置換可能な金属元素の中で単純金属Alが最適であることがわかった。具体的には、 $\text{Sm}(\text{Fe},\text{Al})_{11.5}\text{Ti}_{0.5}$ 相は室温において飽和磁化 $\mu_0 M_s$ が最大1T、一軸結晶磁気異方性 K_u が最大6MJ/m³を示し、広く研究されている $\text{SmFe}_{11}\text{Ti}$ 相を上回る理論的エネルギー積、異方性磁界、永久磁石としての磁気特性を実現する。この磁気特性の向上は、強いスピン軌道相互作用を持つSm 4f電子のエネルギー準位変化に起因する。さらに、他の単純な金属および半金属置換元素(Ga、Si、Ge)を用いた予測においても同様の改善が予測され、これらの理論結果は実験による特性評価によって部分的に確認されている。

BM インフォメーション

【希土類フリー磁石】

Investigation of the phase formation and thermal stability of the L1₀ phase in the MnAlCu system

(H. Baldino⁵, University of central Florida, USA)

MnAl系フェリ磁性L1₀相は、その準安定性が解決されれば商業的に実用可能な材料として有望視されており、MnAlCu系では、3-6原子%のCu範囲でε相の不混和領域が生じ、Mnを置換することで2つの異なるτ相が形成される。ε₂相から形成されるτ₂相は熱安定性が向上している可能性がある。τ₂相をより深く理解するため、8-9原子%のCuを添加したMnAl試料を調査した。この高濃度のCu添加により、少なくとも453 Kまでε→β-Mn+γ₂の共析反応が遅延し、ε₂相が二段階のマルテンサイト変態モードを経てτ₂相へ転移することが確認された。透過型電子顕微鏡画像では、ベイン応力の自己変調を示す交互に現れる双晶界ドメインサイズが確認される。ε₂相の単位格子体積は、Cu含有時が非含有時より約1.5%小さい。τ₂相は750 Kで部分分解を示し、マルテンサイト析出現象を経て、1225 Kで完全にε相へ転移する。磁気特性評価では縞状のドメインパターンが確認され、マルテンサイト板状微細構造と一致し、Cuを含まないτ-MnAlと同様の結晶磁気異方性定数を示す。これらの結果は、MnAl τ相の相形成能力を向上させ熱安定性を高める改質メカニズムに関する知見を提供し、潜在的な商業応用に向けた可能性を示唆している。

A New Approach in Sintered Mn-Bi Magnets via Silane Coupling Agent

(Y. Song⁵, Korea Institute of Materials Science, 韓国)

持続可能で希土類元素を使用しない技術への需要の高まりを受け、Mn-Bi永久磁石が再び注目を集めている。その有望な磁気特性、特にモーター用途に有利な正の温度係数を持つ保磁力(H_c)が理由である。しかし、その実用化は、低い高密度と焼結プロセス中の保磁力(H_c)の劣化によって妨げられている。

本研究では、シランカップリング剤コーティング技術を採用することで、この二つの課題を同時に解決する方法を提案した。従来の焼結は通常、低温相(LTP)の安定性範囲である300~355°Cで行われるが、本研究では高温相(HTP)の446°Cまでの熱処理後もMn-Bi低温相が安定性を維持することを実証した。このプロセスウィンドウの拡大により、約97%の高い密度を有する焼結磁石の作製が可能となった。高温下での結晶粒成長に伴う保磁力低下に対処するため、エポキシ官能基を含むシランカップリング剤を適用した。加熱により、この剤は粒子界面でシロキサンネットワークを形成し、結晶粒粗大化を効果的に抑制しH_cを向上させた。微細構造解析により、結合剤が微細な粒状形態を維持する役割を果たしていることが確認された。この手法は、高密度と保磁力向上の両立を実現することで、Mn-Bi焼結磁石の性能向上に向けた有望な道筋を提供する。

High Anisotropy Field in Fe₃CoB₂ Nanocrystallite Ribbons

(H. Abbas⁵, The University of Texas at Arlington, USA)

本研究では、メルトスピニングプロセスにより高い磁気異方性をもつFe₃CoB₂化合物を開発した。X線回折(XRD)分析によ

り、合成されたナノ結晶リボンが斜方晶構造を有することが確認された。XRDパターンから計算された結晶粒サイズは40 nmで、特異点検出(SPD)技術を使用して求めた異方性磁界は、10.7 kOeであった。300 Kでの磁化曲線は、100 Oeの低い保磁力で153 emu/gの飽和磁化を示した。磁化の温度依存性を示す(M-T)曲線は、キュリー温度が800 Kをはるかに上回り、この相の熱的安定性を示した。ゼロ磁場冷却(ZFC)および磁場冷却(FC)磁化曲線は150 K付近で明確な転移を示し、これはスーパースピングラス的な挙動と関連していると考えられる。これらの結果は、高い異方性磁界と熱安定性を有する、希土類元素を含まない磁性材料としてのFe₃CoB₂の可能性を示している。

Enhanced magnetic anisotropy in (Fe_{0.7-x}Co_{0.3}Zr_x)₂B Nanocrystallites

(P. Joshi⁵, The University of Texas at Arlington, USA)

正方晶構造を持つ遷移金属ホウ化物(Fe_{0.7}Co_{0.3})₂Bは、その本質的に高い磁化、結晶磁気異方性、キュリー温度により、希土類フリー永久磁石用途の有力候補として注目されている。本研究では、アーク融解とメルトスピニングによる急速固化を経て(Fe_{0.7-x}Co_{0.3}Zr_x)₂B(x = 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04)硬磁性相を開発した。X線回折(XRD)から、平均結晶粒サイズが30 nmの正方晶構造を持つ単相の形成を確認した。特異点検出(SPD)解析により、Zrの取り込みは結晶磁気異方性を高め、Zr含有量をx=0からx=0.03に増加させることで、異方性磁界は7.5 kOeから9.5 kOeに増加し、室温の磁化曲線から、飽和磁化(M_s)が130~140 emu/g、保磁力は約0.39 kOeであることがわかった。さらに、磁化の温度依存性データ(ブロッホの定理)よりは、Zr含有量の増加に伴い強磁性交換相互作用が弱まることわかった。これらの発見は、微量のZr置換が磁気異方性を大幅に改善することを示しており、(Fe_{0.7}Co_{0.3})₂Bベースの合金が次世代の高性能永久磁石の有望な候補であることを示唆している。

【フェライト磁石】

Magnetic properties and element site occupation of Zn-substituted W-type hexagonal ferrites (中川ら, 大阪大学, 日本)

フェライト磁石は低コスト、安定性、成分の豊富さで知られており、市場規模では希土類磁石と肩を並べている。W型フェライトは、M型と比べて約10%高い飽和磁化と類似の異方性磁界を持つ有望な次世代材料である。しかし、遷移金属イオンが7つのスピン位置を占める複雑な構造のため、性能向上のために元素位置の占有状況を詳細に理解する必要がある。

本研究では、SrZn_xMn_{2-x}、SrZn_xMg_{2-x}、SrZn_xFe_{2-x}のW型フェライトにおける飽和磁化を向上させる重要な添加物としてのZnを調査した。シンクロトロンX線、中性子回折、EXAFSなどの解析によって、Znはダウンスピンの4eサイトを好むことが判明した。

SrZn_xMn_{2-x}では、Mnは主に4eと6g(アップスピン)のサイトを占めている。サイトの占有率に基づく計算磁化は実験結果とほぼ一致し、Zn含有量とともに増加した。

SrZn_xMg_{2-x}では、Znは4eサイトを好む一方、Mgは主に6gサイトと部分的に四面体サイトを占めていた。アップスピンサイトも占有するMgに対し、ダウンスピンサイトを好むZn含有量が増えるほど磁

化は上昇した。検討したすべてのフェライトにおいて、Znはダウンスピンサイトを占有することで磁化を向上させた。また、Zn、Mn、Mgは特定のサイト(4f_{VI}、2d、12k)をほとんど占有せず、これらのサイトはおそらくFeによって埋められているため、ダウンスピンサイトの4f_{VI}でFeを置き換えることで磁化がさらに高まる可能性がある。本研究では、Zn置換W型フェライトにおける各元素が好むサイトと、それが磁気特性に与える影響を明らかにできた。

【軟磁性材料】

Nd₂Fe₁₇N₃ with planar magnetocrystalline anisotropy for sub-terahertz broadband absorbers

(阿部ら, 日垂化学, 日本)

6Gシステム向けサブテラヘルツ電磁波吸収材料の需要が高まっている。Nd₂Fe₁₇N₃は大きな平面結晶磁気異方性と高い飽和磁化を示し、その固有共鳴によりマイクロ波領域の電磁波を吸収する。本研究では、還元拡散法により製造した3μm単結晶Nd₂Fe₁₇N₃粉末(粉碎工程なし)を用い、初めてサブテラヘルツ周波数域までの複素透磁率を測定した。調製した粉末は球状でα-Feなどの二次相を含まないことが確認された。その後、リン酸塩被覆したNd₂Fe₁₇N₃粉末を熱可塑性ポリアミドエラストマーと混合し、粉末含有率60%の厚さ1mmシートを作製した。シートを所定形状に加工後、インピーダンスアナライザ及びネットワークアナライザを用いて複素透磁率を評価した。Nd₂Fe₁₇N₃粉末の虚数透磁率(μ^{''})の周波数依存性は1~330GHzの極めて広い帯域幅においてゼロを上回っている。VSMを用いて、磁化方向と平行および垂直な方向に沿って測定したNd₂Fe₁₇N₃の減磁曲線から、飽和磁化近似法則(LASA)を用いて計算した飽和磁化は1.71 Tであった。さらに、LASAを用いて得られた磁化曲線を外挿して推定した異方性磁界H_{a2}は約16 Tであった。H_{a2}に基づいて計算したNd₂Fe₁₇N₃の固有共振周波数は、21~150 GHzの範囲にあった。減磁曲線から予測された本材料の固有共振周波数は、前述のμ^{''}の測定結果と著しく異なっていた。したがって、150 GHzを超える周波数領域では、Nd₂Fe₁₇N₃における共振現象は固有共振以外のメカニズムによって生じると考えられる。

Minnealloy Fabrication for High Power Transformers

(A. S. Padgett⁵, Sandia National Laboratories, USA)

産業、通信、電力網技術は変圧器に依存している。これらの変圧器の多くの中には、入手可能性やサプライチェーンのリスクにさらされやすい重要材料が含まれている。希土類元素及び重要材料を含まない代替材料「ミネアロイ(α'-Fe₁₆NC)」が開発中であり、方向性電磁鋼板を上回る飽和磁化(≥ 2.47 T)とアモルファス金属に匹敵する保磁力(バルク相: 197 A/m、加工品: 約5 A/m)を有し、従来の変圧器コア材料の代替を目指している。ミネアロイの低保磁力と巨大な磁束密度は、特定の質量または体積において既存の変圧器コア材料よりも低損失かつサイクルあたりのより多い電力伝達量を実現する。

本研究では、溶湯噴霧(アトマイズ)、低温粉碎法、電着法、スプレー熱分解法によるミネアロイ製造の進捗について報告した。溶融噴霧法で製造した粉末を用いた変圧器用圧粉コアについて、磁

気飽和、保磁力、電気伝導度、20Hz~2MHzにおける複素透磁率を測定し、メルトスピニングで作製したミネアロイ粉末の圧粉コアと比較した。最後に、熱量測定結果を提示し、密度汎関数理論による予測値と比較した。

Soft magnetic properties of Fe-Co-B-Si-Cu nanocrystalline alloys at high temperatures (I. Skorvanek⁵, Slovak Academy of Sciences, Slovakia)

超急冷法により作製した(Fe₆₄Co₂₁B₁₀Si₅)₉₉Cu₁リボンについて、様々な熱処理が組織および高温軟磁気特性に及ぼす影響を調査した。特に、予熱した巨大な銅ブロック間で試料を圧縮する超急速焼鈍(URA)に焦点を当てた。この手法により、非磁性元素含有量を低減したナノ結晶軟磁性合金の合成が可能となり、高い飽和磁束密度(B_s)と低い保磁力(H_c)を併せ持つ魅力的な特性を実現できる。急冷後のリボンは、最適URA処理として決定された490°Cで0.5秒間焼鈍された。比較のため、リボン片を真空炉内で370°C、30分間の従来型焼鈍(CA)処理を施した。その結果、URAの高加熱速度と短処理時間は、CAと比較してより微細なナノ結晶粒(典型的には15~17nm)の形成を促進したことが明らかになった。この結晶粒微細化は軟磁気特性を著しく改善し、保磁力(H_c)をCA処理リボンの210 A/mからURA処理リボンの3 A/mへと低減した。URA処理リボンは1.85 TのB_sを示した。

また、高温におけるURAリボンの軟磁性挙動を調べるため、B-Hループトレーサーを用いて、室温(RT)から425°Cまでのヒステリシスループを測定した。各高温サイクル後、RTで基準ヒステリシスループを記録し、熱暴露中の微細構造における不可逆的変化の可能性を監視した。その結果、URA処理リボンがRTから250°Cまで優れた保磁力安定性を維持しており、高温環境で動作する磁気部品への応用可能性が高いことが明らかとなった。

Fabrication of soft magnetic cores composed of amorphous Fe-B particles for next-generation magnetic passive components

(阿加, 遠藤ら, 東北大, 日本)

鉄系軟磁性材料は、その低い保磁力と大きな飽和磁化から受動部品に広く用いられてきた。しかしながら、渦電流が鉄系軟磁性合金粉末の高周波領域への応用を制限している。この課題に対処するため、軟磁性粉末の粒子径はサブミクロンサイズであり、かつアモルファス状態である必要がある。

本研究では、ナノメートルからサブミクロンサイズまで粒子径を制御可能な非晶質Fe-B粒子を合成し、軟磁性複合材料(SMC)コア(3wt%フェノール樹脂を含む複合コア)を作製し、さらにその高周波磁気特性を評価した。合成直後のFe-B粒子(Fe-B_AS)と焼鈍処理したFe-B粒子(Fe-B_AN)のXRDパターンを見ると、400°Cで1分間熱処理後もFe-B粒子はアモルファス状態を維持し、保磁力は低下した。Fe-B粒子を用いたSMCコアを作製したところ、0.9~1.5 μmの球状粒子を確認した。一方、カルボニル鉄粉(CIP)によるSMCのSEM像では、球状粒子とは異なり変形・凝集した粒子像が観察された。1mTの磁場強度下で100kHz~5MHzの周波数範囲において測定された全SMCコアのコア損失(P_{CV/f})を見ると、Fe-B粒子を使用したSMCコアのP_{CV/f}は、5MHzまでの周波数範囲でほぼ一定であったのに対し、CIP粉末を使用

したSMCコアの $P_{cv/f}$ は、200kHzから徐々に増加し、1MHz以降で急激に増加した。Fe-B 粒子を使用した SMC のこのような低い $P_{cv/f}$ は、粒子サイズが小さく、粒子が非晶質であることから生じる比較的高い抵抗率の組み合わせによるものと考えられる。したがって、Fe-B 粒子の微細構造と磁気特性の組み合わせにより、MHz 帯域の次世代磁気受動部品の実現が可能となる。

Influence of Annealing Treatment on Magnetic Properties of Submicron Sized Amorphous Fe-Co-B Particles

(佐藤, 遠藤ら, 東北大, 日本)

本研究では、水溶液還元法で合成されたサブミクロンサイズの非晶質Fe-Co-B粒子の熱処理が磁気特性に与える影響を調査した。合成された粒子は滑らかな表面を持つ球状で、中央値サイズは約470 nmで、サイズ分布は390~640 nmであった。対照的に、熱処理された粒子の中央値サイズとサイズ分布は合成された粒子とほぼ同じであったが、表面は合成時粒子とは異なり、粗いものとなった。その理由は、400°Cで構造が変化した可能性がある。熱処理温度 $T_a \leq 250^\circ\text{C}$ の場合、 H_c は T_a の上昇により内部応力が解放され、80Oeから10Oeへ有意に減少した。一方、 $T_a \geq 250^\circ\text{C}$ では、 T_a の上昇とともに構造が変化するため、 H_c も増加した。すなわち非晶相だけでなくbcc-Fe-Co相も現れたことが要因である。以上の結果は、約250°CでアニールされたFe-Co-B粒子が非晶質状態のまま、その軟磁気特性を大幅に改善できることを示している。

Influence of heat-treatment on structure and magnetic properties of 10 μm -thick Fe-1,2,3wt.%Si foils

(阿加, 遠藤ら, 東北大, 日本)

Fe-Si鋼板は、低い保磁力と高い飽和磁化のため、さまざまな用途で広く使用されているが、Si含有量が低い場合、高周波帯域での渦電流損失は依然として課題となる。磁歪がほぼゼロで高い透磁率を持つ6.5wt.%の高Si含有率の場合は、製造方法が複雑である。一方で、薄箔化は高周波帯域での渦電流損失を低減する有望なアプローチの一つである。

本研究では、厚さ10 μm のFe-1,2,3wt.%Si箔を準備し、熱処理が軟磁気特性、磁歪、高周波特性(コア損失)に与える影響を詳細に調査した。熱処理温度が上がるにつれて各箔の保磁力は低下し、比透磁率は増加し、軟磁気特性の改善が進んだ。最大磁束密度500 mTの下、100 kHzで各箔のコア損失は、熱処理温度の上昇とともに低下した。これは、熱処理後の粒子成長によるヒステリシス損失の抑制によるものである。さらに、各箔の損失分離から、渦電流損失はわずかに減少し、過剰損失はSi含有量に関係なく熱処理温度の上昇に伴い増加する傾向があることがわかった。Fe-1 wt.%Siの最適熱処理温度は1073 K、Fe-2および3 wt.%Siの最適熱処理温度は1273 Kである。

これらの結果は、適切な熱処理温度が薄いFe-Si箔の磁気特性とコア損失を改善し、数百kHzまでの比較的高周波帯域のパワーエレクトロニクス系における次世代受動部品の磁性材料として応用可能であることを示唆している。

2025年9月8日~11日の間、イタリア・トリノで27th Soft Magnetic Materials Conference (SMM27)が、開催され、軟磁性材料に関連する口頭発表 53件、ポスター発表140件が行われた。Abstractの中から、筆者が興味をもった発表について紹介する。

Novel approaches of high saturation magnetization nanocrystalline materials for powder and wound core applications (岡本, 東北大, 日本)

軟磁性ナノ結晶合金は脆性や急速な熱焼鈍の必要性など、実用化における課題があり、高充填密度の粉末コアや巻線コアの製造は課題が多い。本研究では、高 $\mu_0 M_s$ を有するナノ結晶Fe-Si-B-P-Cu合金を用いた粉末コアと巻線コアを検討した。粉末コア応用には熱間プレス法を採用し、熱間プレス工程中に粉末の塑性変形と良好なナノ結晶化を同時に実現した。熱間プレスコアの充填密度は冷間プレスコアの70%から89%に向上し、コアの $\mu_0 M_s$ は1.55 Tを達成した。さらに、周波数100kHzで100mTの励磁磁束密度におけるコア損失は、冷間プレスコアの852kW/m³から146kW/m³に減少した。これらの特性は、SendustやFe-Si粉末コアなど、広く使用されている市販コアの特性と同等である。一方、リボンの巻線コア用途では、弾性を維持しつつ不要な急速熱処理を回避しながら、FINEMETに匹敵する極めて低いコア損失を実現する新規手法の開発に成功した。ナノ結晶化の開始時にコア損失が急激に減少し、同時に幅数 μm の非常に狭いストライプ(縞状)磁区構造が観測された。この狭いストライプ磁区構造は、リボン内部の垂直磁化を示している。磁化反転過程に基づくコア損失解析により、不可逆磁化過程に対応するコア損失成分が大幅に減少していることが明らかになった。このリボンの一定の磁歪特性は狭いストライプ磁区形成の鍵となる要素であり、このアプローチは従来良好な軟磁性材料と見なされていなかった高磁歪領域への材料探索空間の拡大を可能とする。本リボンを用いた試作巻線コアを製作し、巻線コアにおいても同様の損失低減が明確に確認された。

Alloy development and additive manufacturing of Fe-based Co-free amorphous alloys for soft magnetic applications (I. Gallinoら, Technical University of Berlin, Germany)

市販のKuametやFinemetタイプの粉末を用い、レーザー粉末床溶融(LPBF)により大型で複雑な軟磁性モーター部品の製造に成功した。市販合金で製造した部品は良好な寸法精度と機械的安定性を示すが、層ごとの溶融加工により層間の熱影響部でFe₃Si、Fe₂B、Fe₂₃B₆ナノ結晶の核生成が生じるため、徹底的なパラメータ最適化後も完全な非晶質化は達成できなかった(これにより軟磁性特性がある程度損なわれていた)。

そこで、ガラス形成能力(GFA)を向上させた新しい鉄系コバルトフリー金属ガラス合金を設計した。三元系Fe-Si-Bの共晶点を再評価し、三元共晶組成のGFAは、臨界製造厚さを1 mm以上に維持しつつNbとNiを系統的に添加することで強化され、完全非晶質部品の積層造形を可能にした。

新規開発された多成分組成物向けに、非晶質粉末製造のための超音波溶解プロセスが開発・スケールアップされた。LPBFプロセスの広範なパラメータ最適化により、完全アモルファス軟磁性材料加工における基礎的な加工-微細構造-特性関係が確立できた。

この部品の保磁力は、完全な非晶質化ができなかったローター ($H_c=0.51$ kA/m, $M_s=1.29$ T)と比較して、2桁減少している。また、1kHzの高周波数における電力損失の劇的な低減が確認され、これにより同期リラクタンس機や軸方向磁束機などの新規電磁システム的设计が可能となった。

Grain size dependence of magnetostriction effects on excess loss in nanocrystalline soft magnetic materials

(塚原ら, 東北大, 日本)

軟磁性材料のエネルギー損失は、ヒステリシス損失、古典的渦電流損失、過剰損失に分類される。過剰損失は磁壁の運動に起因する異常渦電流損失によって説明されてきた。G. Bertottiは、この異常渦電流損失が保磁力と関連しており、したがって粒子径が重要なパラメータであると示唆した。一方、近年、ナノ結晶軟磁性リボンにおける過剰損失は磁歪に起因すると報告されている。

磁性材料が磁歪を示す場合、磁壁は局所的なひずみを生じさせ、材料の粘性により磁壁運動に抵抗力が作用する。この力は軟磁性材料に誘起された磁気エネルギーを散逸させ得る。しかしながら、磁歪に起因するこのエネルギー損失の粒径依存性は依然として不明であり、本研究では、磁歪による過剰損失への粒径の影響を明らかにするため、微小磁気シミュレーションを実施した。

ランダウ・リフシッツ-ギルバート方程式を解くことで磁化ダイナミクスをシミュレーションし、同時に磁歪効果を考慮した格子ダイナミクスも計算した。一連のシミュレーションにおいて、平均粒径を12.7 nmから147.9 nmまで変化させ、平均粒径によって2種類のシミュレーションモデルサイズを用いた。これらのモデルを用いて磁壁の振動をシミュレーションし、エネルギー損失を算出した。小規模モデルと大規模モデルにはそれぞれ4つと8つのストライプ磁区が存在する。飽和磁化、交換スティフネス定数、弾性定数といった α -Feパラメータを選択した。本シミュレーションでは、磁歪効果に焦点を当てるため結晶磁気異方性を無視した。

平均飽和磁歪の異なる値(0 と -9.8×10^{-5})における計算されたエネルギー損失と粒径の関係を見ると、磁歪によるエネルギー損失は、粒径が磁壁幅よりも小さい場合に粒径の増加に伴って増加する。しかし、平均粒径が磁壁幅を超えると、エネルギー損失は粒径の影響を受けにくくなる(一定となる)。この粒径依存性は平均飽和磁歪を減少させることで弱められるが、平均飽和磁歪がゼロであっても、粒径によるエネルギー損失はわずかに増加する。これらの結果は、局所ひずみが粒径に依存することを示し、軟磁性材料のエネルギー損失メカニズムに関する示唆を与える。

Iron loss and magnetization dynamics of amorphous and nanocrystalline ribbons with various magnetostriction

(小野ら, 東北大, 日本)

近年、パワーエレクトロニクスシステムにおいて小型化と高効率化が強く求められており、このため、高周波領域における低損失磁性コアの開発が極めて重要である。

本研究では、磁化過程に基づく広帯域鉄損解析を、飽和磁歪定数 λ_s の異なる($0 \sim +38 \times 10^{-6}$)アモルファス($\text{Fe}_{80}\text{Si}_9\text{B}_{11}$)およびナノ結晶($\text{Fe}_{80}\text{Nb}_6\text{B}_{14}$, $\text{Fe}_{85}\text{Nb}_6\text{B}_9$, $(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{86}\text{B}_{14}$)リボンに対して実施した。

試料は外径10mm、内径6mmのリング形状とした。周波数範囲10Hz \sim 5MHzにおける広帯域鉄損 W の挙動は、低い λ_s と高い λ_s で大きく異なる。可逆磁化過程に対応する鉄損成分 W_{rev} と不可逆磁化過程に対応する W_{irr} は、磁化過程分解モデルから評価した。 W_{irr} は低周波数領域で λ_s の増加に伴い著しく増加し、より大きな λ_s では、高周波数領域まで高いままであった。

時間分解ベクトルMOKE(磁気光学Kerr効果)顕微鏡で観測された動的ドメイン構造を見ると、より大きな λ_s では、大きな磁区が生成され、低周波数領域では磁壁の移動が主たる磁化過程であり、周波数の上昇に伴い、磁壁の移動距離は小さくなり、主たる磁化過程が磁化回転に変化することが判明した。

対照的に、低い λ_s の試料では全周波数域において磁区構造が微細なストライプ状で不明瞭であった。低周波数領域においても磁壁の移動はごくわずかであり、磁化回転が支配的であることを示した。鉄損解析の結果は、磁区構造におけるこれらの異なるダイナミクスを考慮することで理解できる。