

内外BM技術動向

**JABM 副会長
元・日立金属(株)
諏訪部 繁和**

2025年7月27日(日)～31日(木)の5日間、国立研究開発法人物質・材料研究機構(NIMS)の主催により、第28回希土類磁石ならびに次世代磁石とその応用に関する国際ワークショップ(The 28th International Workshop on Rare Earth and Future Permanent Magnets and Their Applications, REPM2025)がほぼ国際会議場にて開催された。

本ワークショップは、1974年に米国Daytonで初開催されて以来、これまで世界各地で継続的に開催されてきた伝統ある国際会議であり、日本での開催は、箱根、京都、仙台、長崎に続き今回が5度目で、2012年の長崎以来13年ぶりとなった。

今年のワークショップには、世界24カ国から365名の参加があり、日本(118名)、中国(80名)、ドイツ(29名)、韓国(26名)、米国(24名)の他、英国、フランス、オーストリア、ロシア、インド、ブラジルなど3分の2が海外からの参加者であり、盛会となった。

発表プログラムとして、4件のPlenary Talkと22件のInvited Talkを含む79件の口頭発表と、143件のポスター発表(アブストラクトは提出されたが、当日ポスター掲示なしもの22件あり)が行われた。

冒頭のPlenary talkでは、REPMステアリングコミッティ議長の**Prof. Oliver Gutfleisch (TU Darmstadt, Germany)**から、最近注目されている研究開発分野、今回のワークショップでの講演トピックスが示された。

A critical review of permanent magnet materials: options for reduction, substitution and recycling of strategic elements

- $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 磁石の重希土類(Heavy Rare Earth : HRE)削減/フリー(DyとTbを削減)
- REリーン(1:5 Sm-Co \rightarrow 2:14:1 \rightarrow 2:17 Sm-Co \rightarrow 1:12 Sm-Fe)
- Nd-Fe-Bへの低価格RE添加 (Ce, Laを利用)
- REフリー磁石(Mn-Al, Fe-Ni, Fe_{16}N_2)
- ショートループとロングループのリサイクル
- 熱間加工によるネットシェーピング
- アディティブ・マニファクチャリング
- 機械学習による合金および微細構造の予測設計とハイスループット実験法

以下に、PlenaryとInvited Talkの講演を中心にいくつかの講演内容(要点のみ)を紹介するが、REPMは未発表の成果を報告する学術講演会というよりも、最近の研究成果や開発状況をレビュー的に講演する場であるため、過去に別の場で発表済みのものが多いことをご承知おきたい。

【Nd-Fe-B磁石】

重希土類フリー/省重希土類に関わる取り組みとして、特にPr系合金など、重希土類を使用しない粒界拡散に関するテーマが多く、粒界相や粒界幅に注目した観察、分析も実施されている。また、結晶粒の微細化も含め、熱間加工磁石に関するものが多く、逆に焼結磁石メーカーの発表が少ない。

Breaking Performance Limits in Nd-Fe-B Magnets via Extreme Grain Optimization and Grain Boundary Diffusion Synergy (Jianing Wang⁵, 煙台正海磁材, 中国)

結晶粒最適化と粒界拡散(粒界相制御)の組み合わせで超高性能磁石を開発し、中国における高性能磁石の指標である $\text{BHJ}=(\text{BH})_{\text{max}}(\text{MGoe})$ と $\text{H}_{\text{CJ}}(\text{kOe})$ の合計値が、Tb拡散後の特性で $87.3 : (\text{BH})_{\text{max}}=44.4 \text{ MGoe}$, $\text{H}_{\text{CJ}}=42.9 \text{ kOe}$ に達した。プロセス条件と合金組成を体系的に最適化することで、粒界相形成元素の比率が調整され、拡散前の磁石の平均粒径は $4.82 \mu\text{m}$ から $2.28 \mu\text{m}$ に微細化され、粒度分布も改善された。さらに、Tb拡散処理後でも結晶粒成長が制御され、最適化された磁石では平均粒径が $2.41 \mu\text{m}$ で優れた粒度分布($\sigma=1.91 \mu\text{m}$)を示した(従来磁石では平均粒径 $5.05 \mu\text{m}$, $\sigma=4.5 \mu\text{m}$)。EPMA分析により、HREの勾配分布を有する連続したTbリッチ粒界相が確認された。

New Insight into Development of Pr-based Grain Boundary Diffusion Process for High-Performance HRE-free Nd-Fe-B Sintered Magnets (Tae-Hoon Kim⁵, Korea Institute of Materials Science, 韓国)

Nd-Fe-B磁石への粒界拡散プロセス(Grain Boundary Diffusion Process; GBDP)中に発生する組成誘起液膜移動(Chemically Induced Liquid Film Migration; CILFM)と呼ばれる独特の粒界移動現象を抑制することで、結晶粒成長を抑え、PrのGBD深さを増加させ、Pr濃度の高い薄いシェルを形成する方法として、HRE(Heavy Rare Earth)フリー 2段階GBDPを開発した。

第1段階でCILFMを阻害するための高融点金属(RM)化合物または合金を用いたGBDPを行い、第2段階で 高異方性Prリッチシェルを形成するための低融点Pr含有合金を用いたGBDPを行う。第1段階に用いる拡散材として低融点のTaF₅化合物(TFと表記)、共晶Ti-Cu(TC)、Zr-Cu合金(ZC)を選択した。

HREフリーNd-Fe-B磁石の保磁力は、Pr-GBDP処理のみ(1段階GBDP)の磁石では、1.45 Tから1.85~2.0 Tに増加したことに対して、CILFM阻害2段階GBDPによる磁石の保磁力はそれぞれ2.35 T (TF-Pr-GBDP、保磁力利得:0.91 T)、2.46 T (TC-Pr-GBDP、保磁力利得:1.02 T)、2.47 T (ZC-Pr-

BM インフォメーション

GBDP、保磁力利得:1.03 T)に達した。1段階および2段階GBDP磁石の残留磁束密度は、1.35 T (1段階Pr-GBDP)、1.31 T (TC-Pr-GBDP)、1.30 T (ZC-Pr-GBDP)となった。

TEM観察の結果、第1段階GBDP処理中にナノサイズのRM含有析出物が粒界に沿って形成し、第2段階GBDP中にPrリッチシェルを形成するCILFMの発生が抑制することによって、2段階GBDP処理磁石では粒径が縮小して、PrのGBD深さは増加し、よりPr濃度の高い薄いシェルが形成されることが確認された。

Reduction of heavy rare earths in Nd-Fe-B-based magnets by diffusion source and application area optimization

(Imants Dirbaš, TU Darmstadt, Germany)

電気自動車用の永久磁石同期駆動モータで磁力低下の影響を強く受けやすい磁石のコーナーやエッジなどの領域の保磁力を選択的に向上させるためにHRE利用の最大化を検討した。HRE拡散源として水素化物TbH_x、およびTb₁₀Pr₆₀(Cu, Al, Ga)₃₀などのTb含有合金を使用し、ベース材料には商用グレードのNdFeB焼結磁石を用いた。TbH_x水素化物の場合、HREの利用効率が低だけでなく、拡散が遅くなり、拡散深度も短い。

Tb含有合金の場合、0.4 wt% Tbを拡散すると、120 °Cで1014 kA/mの保磁力が得られ、残留磁束密度は初期磁石の約1.45 Tから拡散後では1.43 Tとわずかに減少した。また、0.3 wt% Tbの場合には、J_r = 1.4 T, H_c = 1990 kA/m (2.5 T) & H_c = 747 kA/m (0.94 T) @ 150 °Cの結果が得られた。耐食性もTbH_xを拡散した磁石に比べて良好である。

Tb拡散後の保磁力分布を明らかにするため、3D Hall ScannerやMOIF(Magneto-Optical Indicator Films)を用いて空間的な保磁力マッピングを測定した結果、コーナー部では、初期の磁石と比較して保磁力は587 kA/m増加し、約1600 kA/mに達する最も高い保磁力を示した。また、保磁力の減少は拡散源(コーナー部)からの距離に比例することもわかった。さらに、Tb含有合金拡散源を付着させる場所を変えた磁石を作製し、保磁力分布を調査した。

Nd-Fe-B magnets: Young researchers innovate and veterans improve

(佐川,大同特殊鋼,日本)

Nd-Fe-B焼結磁石の開発当初の特許出願に際し、基本特許から数件は自らを筆頭発明者としたが、以降は実際に材料・組織・プロセス開発に携わった各々の若手研究者を筆頭発明者としてモチベーションアップを図ったことを紹介。イノベーションを生み出すのは若手研究者であるとの期待を示した。また究極の磁石をめざすのはベテラン研究者であるとして、自らも①重希土類フリーのためのHeやH₂ガスを用いたジェットミリングによる結晶粒微細化、②ニアネットシェイブプロセス、③渦電流損低減を目的とした積層磁石、の開発に精力的に取り組んでいることを紹介。若手とベテランの両方を勇気づける内容である。

Cost-Effective Manufacturing of Nano-Grain Neo Magnet

(Jun Cui⁵, Ames National Laboratory, USA)

ナノ結晶異方性Neo磁石は、その粒径が磁区サイズに匹敵し、過剰なHRE含有量なしに高い保磁力を可能にするための有望な代替手段だが、従来のナノ結晶磁石の作製は、緻密化のためのホットプレスとテクスチャリングのための熱間加工の2段階のプロセスがあり、コストや生産性に課題があるため、ナノ結晶Neo磁石の斬新な半連続的二アネットシェイブ作製法を考案した。

ナノ結晶Neo粉末で密封された高温容器を780 °C(予備加熱)で、75%の厚さ減少まで冷間圧延し、室温での(BH)_{max}が40 MGOe、180 °CでのH_{cj}が5.8 kOeに達する、板状の高密度異方性磁石が得られることを実証した。さらに、加工条件(Novel hot roll method、Multi path等)が微細構造の変化と磁気特性に及ぼす影響についても検討を行い、HREへの依存を減らした高性能Nd-Fe-B磁石のスケラブルな生産の可能性を検討している。

Rare earth permanent magnets with a high cerium content

(Dagmar Goll⁵, Aalen University, Germany)

NdFeB焼結磁石のNdをCeに置換した場合の微細構造と特性の相関関係、課題と限界、添加物の影響などを検討した。これまで焼結磁石では、Ndの最大30 %をCeで簡単に置き換えることが可能であったが、Ce置換の割合が高いと、Ce₂Fe₁₄Bの固有の磁気特性がNd₂Fe₁₄Bに比べて劣り、また粒界でのラーベス相Fe₂Ceの顕著な形成により磁気特性が低下し、ハード磁性相と希土類に富む粒界相の量が減少する問題があった。Fe₂Ceは、>~43 °Cの温度で常磁性となり、ハード磁性2:14:1粒子の三重接合部で凝集する傾向があり、限られた範囲でしか濡れない。Fe₂Ceは磁化反転時に潜在的な核形成中心として機能する可能性があるため、磁石の保磁力が減少する原因となる。Ce含有量が非常に高い(>80 %)と、軟磁性Fe相が析出し、特にストリップキャストブレードを出発材料として使用する場合、さらに小さな保磁力場が生じる。一方、急冷磁石では急冷中にFe₂Ceの形成が抑制され、NdをCeに完全に置き換え可能となるが、等方性であるため、残留磁束密度は焼結磁石の約半分になってしまう。今回、(Ce, Nd)-Fe-B-M (M、例えば Co、Al) 組成の50 %以上のCe置換度の焼結磁石で、急冷磁石ですでに実証済であるLa、Si、Yなどの添加物の効果を検討したところ、La添加により、La-free組成よりも2:14:1相が多く、Fe₂Ce相が大幅に少なくなり(最大85%減少)、希土類に富む粒界が形成され、市販のCe置換度がかなり低い磁石に迫る磁気特性が得られ、B_rは約25 %増加した。

【観察・評価法】

Three dimensional multimodal analyses on Nd-Fe-B magnets

(岡本ら, 東北大, 日本)

Nd-Fe-B磁石の3次元マルチモーダル解析に関する最近の研究について、走査型電子顕微鏡(SEM)とX線磁気円二色性(XMCD)顕微鏡の3次元(3D)可視化技術、3D-XRDの結果を紹介した。

外部磁場を変化させながら、磁気ヒステリシス曲線に沿ってTb-Cuを拡散させたNd-Fe-B焼結磁石の3D磁区構造と微細構造を3D-XMCDと3D-SEMを用いて複合観測することに成功した。Nd-Fe-B磁石体内部の磁区構造変化を初めて観測したもので、微細構造との間に強い関係があることを明らかにした。特に、Nd-Fe-B熱間加工磁石は、焼結磁石と比べてより均一な微細構造と単純な磁区構造を持つため、XMCD信号の精巧なノイズ低減プロセスの後、非常に明確な磁区の変化が見事に観察され、Nd-Fe-B熱間加工磁石の主要な磁壁ピンニングサイトと磁区成長過程について論じることが可能になった。さらに、保磁力と磁気ヒステリシス曲線を理解するためには、構成粒子の結晶方位を知ることが重要であるが、Nd-Fe-B焼結磁石は、鋼に比べて粒径が一桁小さく、結晶構造の対称性も劣るため、3D X線回折(3D-XRD)技術を用いた3D結晶方位イメージングの測定が困難であった。今回、諸問題を解決し、Nd-Fe-B焼結磁石での実証に成功した。

【永久磁石応用】

High-Speed and High-Efficiency Cooling Fan Motor with Nd-based Bonded Magnet and Fe-based Nanocrystalline Soft Magnetic Alloy

(中村ら, 東北大, 日本)

開発目標仕様が54 mm Dia, Torque 200 mN・m, 12,600 rpm, Output 264 W, Efficiency 93 %のクーリングファンモータの開発へ取り組んだ。高速回転に伴う磁石渦電流損を防ぐため、Ndボンド磁石を採用し、極異方性ボンド磁石を用いて磁束を最大化し、トルクを強化。また、リラクタンストルクを利用するためにインセットローター構造を採用しトルクをさらに向上させた。プロトタイプのはめ込み式永久磁石(PM)モータは、目標のトルクと出力電力を正常に満たし、最大効率91 %以上を達成した。

さらに、NANOMETと呼ばれるFe系ナノ結晶軟磁性材料を積層したコアを用いてモータステータを作製し、PMモータに一体化。鉄損が下がったことにより、従来の電磁鋼板(35A300)を用いたモータと同等のトルク特性を維持しながら、最大効率95 %以上を達成した。

【資源・サプライチェーン・リサイクル関連】

Re-establishing Mine-to-Magnet Manufacturing in the United States

(Edward Pangら, MP Materials, USA)

米国内でレアアース原料の採掘から磁石製造までを一貫して完結させる取り組みの進捗状況を紹介した。米国カリフォルニア州 Mountain Passでは、採掘から希土類濃縮原料生産(Stage-I)、分離・精製(Stage-II)を実施。一方、テキサス州のFort Worthでは、電解によるメタル化、ストリップキャスト合金製造から

磁石製造(Stage-III)までをPilotラインで開始した。

HREE Projectでは重希土類の分離、メタル製造をPilotラインで実施。磁石製造ではxEV向けに粒界拡散磁石にも取り組んでいる。

Recent development in recycling of RE permanent magnets of the RE-Fe-B type: Challenges and solutions.

(Carlo Burkhardtら, Pforzheim University, Germany)

Nd-Fe-B磁石に関わる欧州での課題とバリューチェーン全体にわたるリサイクル技術の開発に、産学官が協力して取り組んでいる内容を紹介。欧州では重要原材料法(Critical Raw Materials Act; CRMA)を定め、持続可能で循環型のソリューションを通じて原材料を保護することの戦略的重要性を強調している(循環型経済は、輸入依存を減らし、技術革新と欧州の産業競争力と環境の持続可能性を促進する)。

欧州で希土類(RE)永久磁石の循環型経済を確立するための課題(障害)として、RE磁石が電子機器に深く埋め込まれているため、分離が困難でコストがかかり、リサイクルプロセスが複雑であること、収集およびリサイクルインフラストラクチャの利用可能性が限られているため、材料の回収が妨げられていること、欧州諸国全体での技術的な制限と一貫性のない廃棄物分類基準は、取り組みをさらに複雑化していることを上げ、これらの課題に対処するため、高度なリサイクル技術への協調的な解決策と投資、および廃棄物の収集と処理を標準化するための調和のとれた効率的な規制の枠組みの確立を必要としている。

特に、廃磁石のリサイクルについては、従来のLong Loop Recycle(廃磁石を溶液に溶かして希土類元素を分離、精製する方式)に加え、Short Loop Recycle と称する、廃磁石を水素粉砕した粉末を磁石原料に使用する方式、廃磁石を溶解してSC(Strip Cast)合金化する方式に注力している。

さらには、Nd-Fe-B磁石とフェライト磁石を用いたモータの選別自動機、GD-OES(Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy)を活用した磁石Coatingの選別(Ni-Cu-NiやZnの組成、層数、厚さ)、選別を容易にするための磁石へのラベル付け、などに取り組んでいる。

Rapidly Quenched Rare Earth Iron Boride Magnets

(David Brownら, University of Birmingham, UK)

ナノ結晶Nd-Fe-B磁性材料の歴史と現状を概観し、超急冷Nd-Fe-B磁石材料は、焼結磁石に対し特定の利点を提供することに言及。これまでHDDのスピンドルモータ用途や自動車および産業用モータのラジアル配向リング磁石など、ネットシェイプの成形性を活かし、ボンド磁石や熱間加工磁石が開発、量産されている。また、結晶粒の微細化によって高い保磁力が得られるため、重希土類元素(Tb, Dy)を含まないことが優先される用途で使用されている。

最近では、超急冷Nd-Fe-B技術がスクラップ希土類磁石のショートループリサイクルに適用されている。ダイレクトリサイクルには、一次材料の鑄造に比べて、再現性のある組成管理や磁石コーティングからの汚染物質など、いくつかの課題があるが、急冷・成形プロセ

BM インフォメーション

スの汎用性は、スクラップ希土類磁石のリサイクルに一定の利点をもたらす。これらの利点には、スクラップ原料に少量の高融点金属を添加するなど、その場での組成調整が含まれ、これにより、急冷性能、結晶粒微細化、薄片形態、粉末の圧縮性、そして最終的な磁石性能が向上する。さらに、より低コストの代替品を提供するために、より低い希土類組成を製造することができる。超急冷技術に残された究極の課題は、現在可能な範囲を超えて微細構造を精密化した交換スプリングナノコンポジット構造の製造である。

【RE窒化物】

Novel High Frequency Magnetic Properties of Rare Earth-Transitional Metal Intermetallic Compounds

(Jinbo Yang⁵, 北京大学, 中国)

結晶磁気異方性は、ほとんどの磁性材料の性能と用途を決定するが、長年にわたり、一軸異方性が強い希土類永久磁石材料の探索が希土類-遷移金属 金属間化合物の研究の主流であった。

一方、複雑な円錐形異方性や面内異方性を持つ希土類-遷移金属 金属間化合物はあまり注目されてこなかったが、希土類-遷移金属 金属間化合物のほとんどは、主に容易面異方性または容易円錐異方性を示し、新しい高周波磁性材料やトポロジカル電子材料としてのアプリケーションが考えられる。様々な元素置換と格子間原子効果を利用して希土類-遷移金属の飽和磁化、キュリー温度、結晶磁気異方性を変化させることで、永久磁石材料から軟磁性材料まで幅広い材料の設計と応用が考えられる。

特に、 $R_2Fe_{17}N_3$ ($R=Y, Ce, Pr, Nd$ など)材料では、軸方向異方性磁場 H_0 と面内異方性磁場 H_ϕ の比を変えることで、スネーク限界を大幅に向上させることが期待され、次世代の高効率電磁波吸収・軟磁性材料となる可能性がある。

【Sm-Fe-N系磁石】

Process development of high-performance Sm-Fe-N permanent magnet

(平山⁵, 産総研, 日本)

まず、 $Sm_2Fe_{17}N_3$ 単結晶粉末の粉砕プロセス改良の取り組みを紹介。ジェットミルプロセスでは、従来よりも粒度分布が格段に狭い粉体を合成でき、粉末の磁気特性は保磁力と残留磁化共に7%以上改善した。一方、還元拡散法は、粒子間のネッキングが強いため配向が悪いという問題あったが、ウェットジェットミルで適切に粉砕することで、 $(BH)_{max}$ 370 kJ/m³を超える粉末の合成に成功した。これらの粉末合成プロセス開発に加えて、液相焼結による $Sm_2Fe_{17}N_3$ 磁石の作製についても取り組んでいる。

また、 $TbCu_7$ 型FeリッチSm-Fe-N化合物を得るため、SmをZrやYで置換した化合物の合成を熱プラズマプロセスを用いて試み、Fe/Sm(at%)比が8.5より大きく、Feリッチな $SmZrY$ -Fe-N化合物単結晶粉末の合成に成功した。

【Sm-Co磁石】

Phase transition in Sm-Co and its interesting phenomena

(Hubin Luo⁵, 寧波材料技術工程研究所, 中国)

Sm-Coに関する研究のほとんどは、その保磁力に重要な役割を果たす $SmCo_5$ と Sm_2Co_{17} の相分離によるセル状微細構造の形成に焦点をあてている。本報告では、Sm-Coの結晶相とアモルファス相間の相転移について紹介し、この相転移が本質的に機械的挙動や冶金学的挙動といった様々な材料特性に大きな影響を与えることを示した。

Sm-Co化合物の応力誘起アモルファス化は、せん断帯形成によって大きなひずみを吸収することができ、通常、帯状構造内での亀裂開口につながる局所的な膨張/収縮を伴わないことを発見した。アモルファス状態からの結晶化については、Sm原子が格子を形成しているものの、Co原子は面間で依然としてアモルファス状態にある場合、半結晶核形成が起こる。このため、核形成時の界面エネルギーは極めて低くなる。

【1-12系磁石】

Origin of high coercivity in post-sinter annealed Cu-doped $Sm(Fe,Ti,V)_{12}$ -based sintered magnets

(Jiasheng Zhang⁵, NIMS, 日本)

$SmFe_{12}$ ベースの焼結磁石でも、焼結後熱処理(Post-Sinter Annealing; PSA)が、Nd-Fe-B焼結磁石と同様に連続粒界相の形成に効果的で、保磁力をさらに増加させることができるかを検討した。 $Sm_8Fe_{77}Ti_5V_8Al_2$ at%(Cuフリー)と $Sm_8Fe_{76.5}Ti_5V_8Al_2Cu_{0.5}$ at%(Cuドープ)焼結磁石は、1100 °Cで1.5時間焼結し、1100 °Cで1.5時間 PSAを施した後で比較すると、Cuフリー磁石の保磁力は0.93 Tから1.05 Tに向上したのに対して、Cuドープ磁石では0.9 Tから1.48 Tに大幅に向上した。この保磁力の増加の起源を理解するために、XRD、TEM、およびローレンツ顕微鏡によって詳細な微細構造を観察した。Cuフリー磁石では強磁性 $SmFe_2$ の存在が観察されたが、最適にアニールされたCuドープ磁石ではこれが完全に除去でき、優れた相互接続性を持つ厚く連続的なSmリッチ粒界相が観察された。厚いSmリッチ粒界相の形成は、1:12粒間の交換結合を減少させ、保磁力を高めることができる。Cuの添加が、最適にアニールされた1:12焼結磁石において、 $SmFe_2$ 相を抑制し、Smリッチな粒界相を形成することにより、大きな保磁力を実現するために有益であることを示した。

【希土類フリー磁石】

Do we really need a gap magnet?

(J. M. D. Coey, Trinity College Dublin, Ireland)

2012年には、フェライト磁石(<38 kJ/m³)とNd-Fe-B磁石(>200 kJ/m³)の間のギャップで、100~200 kJ/m³のエネルギー積を持ち適切な価格帯で新しい磁石を実現する見通しについて議論したが、近年までの開発状況を見ると、特性的なギャップは埋まっていない。

固有の磁気特性に優れる新化合物を見つけ、熱力学的に安定な保磁力と磁化曲線の角形性を実現するために必要な微細構造を経済的プロセスで開発するハードルは依然として高いままである。希土類フリーの材料は成功しておらず、Sm-Fe-Nや1-12系

は、Nd-Fe-Bからの大きな特性の向上は見られない。Exchange Spring 磁石も大きな進展はない。フェライト磁石のわずかな改良、重希土類フリーや省重希土類Nd-Fe-B磁石における特性向上と価格変動、ローエンドでのNd/PrをCe、La、およびYで置換した磁石の増加などの動きに限定されている。

タイトルに挙げた質問に対する答えは、科学的というよりは政治的なものであり、採掘から永久磁石の応用製品の製造までのすべてのステップをカバーする独立したサプライチェーンを確立できるかどうかにかかっているという見解。

【ハイスループット実験法】

Thin film combinatorial studies of hard magnetic materials

(Nora Dempsey⁵, Institut NEEL, CNRS, France)

組成的に傾斜された薄膜の作製と特性評価に基づく組み合わせ研究は、ハード磁性材料を含むさまざまな機能性材料のスクリーニングと最適化に使用されている。機械学習(ML)と組み合わせることで、薄膜ベースのコンビナトリアル研究は、新材料のデータ駆動型設計を導く大きな可能性を秘めている。

本研究では、異なる高異方性相に基づく組成傾斜RE-TM(希土類-遷移金属)薄膜を、非対称のターゲット(FePt)や異材質の複数ターゲットを同時に用いるスパッタリング法(LaFeB、CeFeB、NdFeBやSmFe、Sm、Vなど)を用いてSiウエハ基板上に作製し、5 mm間隔でのハイスループット特性評価(MOKE、SEM、XRD、組成など)、データ処理および解析を行った。

【AI・機械学習】

Artificial Intelligence Assisted Optimization of Permanent Magnets

(Thomas Schrefl⁵, University for Continuing Education Krems, Austria)

物理モデルを統合することで長さスケール間のギャップを埋め、材料設計を支援する機械学習手法を開発し、原材料費を考慮した磁石設計ガイドラインが算出された。

走査型電子顕微鏡(SEM)画像から出発して、2次元画像で観察される統計的な粒分布を再現する3次元合成微細構造を再構築した。機械学習モデルのトレーニングデータを効率的に生成するために、磁化反転の低次元モデルを開発した。これにより、従来のマイクロマグネティックシミュレーションの計算限界を超える大粒径磁石のシミュレーションが可能になった。合成生成した微細構造はこのモデルの入力として使用され、磁化過程の現実的なシミュレーションが可能になり、このアプローチを用いて、大粒径磁石における磁化反転時の磁区変化を解析した。

合成微細構造生成と低次元モデルの両方を用いて、減磁曲線を推定する高速モデルを構築した。合成粒状構造をグラフとして表現し、低次元モデルで計算された減磁曲線を用いてグラフニューラルネットワークを学習させた。学習済みのネットワークは、完全なマイクロマグネティックシミュレーションと低次元モデルの結果と一致する正確な減磁曲線を予測できた。

最終的には、上記のヒステリシスモデルから導出された微細構造パラメータは、最小価格と最大の保磁力を実現するために化学組成を最適化する遺伝的最適化アルゴリズムに使用された。

Enhancing Research and Development Efficiency through Decision-Making Based on Experimental Data Feature Extraction

(矢野ら、トヨタ自動車、日本)

材料の研究開発の過程で発生する多様なデータを意思決定に活用し、研究開発効率の向上を図るため、WAVEBASE®を解析ツールとして開発した。

磁性材料の研究開発では、X線回折(XRD)測定や走査型電子顕微鏡(SEM)観察などの分析を行っているが、材料の性能や構造を最適化し、材料解析データを用いて性能発現メカニズムを解明するためには、機械学習モデルの構築が有益である。しかし、機械学習モデルの作成には、材料分析データを適切に定量化すること、サンプル数が説明変数数を上回っていることが必要となり、サンプル数を増やすとコストが高くなるため、サンプルサイズを大幅に拡大することは困難な作業であった。そこで、XRDやSEMの画像データを次元削減によって特徴づけ、限られたサンプル数でも効果的な機械学習モデルを構築する技術を開発した。

なお、Closing Remarksで、次回のREPM2027は、2027年8月29日(日)～9月2日(木)にブラジルの Belo Horizonte で開催予定であることが、アナウンスされた。