

2.4.5 磁石・磁性材料

(1) 研究開発領域の定義

材料物性としての磁性には様々な種類があるが、ここでは、モータや大電力用途などのパワーエレクトロニクスに関係の深い強磁性材料を取り上げる。強磁性材料には保磁力の高い永久磁石材料と、保磁力がゼロに近い軟磁性材料がある。

モータの高性能化の鍵を握る永久磁石用の強磁性材料には、高い保磁力および飽和磁束密度と、 -50°C から 200°C といった環境温度での動作安定性が求められるのに加え、資源制約にかからない元素からなることが望まれる。さらに、機械強度、電気抵抗といった機械的・電気的性能も重要な物性であり、特に後者はモータの高速回転時には界磁の時間変化により誘導される渦電流損および磁石の発熱の抑制に重要である。一方、インバータ用コイル、変圧器磁心、モータの磁路、電磁波シールドなどに用いられる軟磁性材料は、強磁性体（フェロ磁性体、フェリ磁性体）の中で、比較的簡単に磁極が消えたり反転したりする材料であり、保磁力（抗磁力）が低く高い透磁率を有し、高い飽和磁束密度と高周波での低い損失といった特性が望まれている。磁性材料の性質は組成だけでなく材料組織にも大きく影響されるため、ナノからメソに至るまでの材料構造制御技術や製造プロセス技術上の開発課題がある。

(2) キーワード

保磁力、残留磁束密度、最大磁気エネルギー積、キュリー温度、結晶磁気異方性、希土類磁石、ネオジム磁石、フェライト磁石、ボンド磁石、サマリウムコバルト磁石、金属磁性体、高周波、渦電流、比抵抗、導電率、微粒子、扁平微粒子、複合材料、グラニューラー材料、パワーエレクトロニクス、電磁ノイズ抑制

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

強磁性材料は、モータ、発電機等の電力用途から、トランス/インダクタとしてのエレクトロニクス用途等に幅広く応用されており、材料の特性改善が、それらの機器・デバイスの電力効率の向上に大きな貢献を果たす。

モータ、発電機に使われる永久磁石が、広い動作温度にわたって安定に磁束を供給するためには、磁気秩序を保つ上限温度であるキュリー温度が高いこと、飽和磁束密度が大きく温度変化が小さいこと、外部磁界に対する磁化の安定性の指標である保磁力が大きいこと、の3点がすべて満たされることが必要である。現在、最も高性能な永久磁石材料としてモータ用途に広く用いられているNd-Fe-B系磁石（ネオジム磁石）は、現在知られている材料中最大の飽和磁束密度と高いキュリー温度を持つが、高温で保磁力が低下することが知られていた。高温保磁力を向上させるためには、資源国が限定され安定供給に不安があるDyやTbなどの重希土類元素を少量添加する必要がある。さらに、材料中に30重量%程度含まれるNdの需要量も、資源的には重希土類ほど希少ではないにもかかわらず、今後のモビリティ電動化の急拡大、大型風力発電設備の建設、ハードディスク型磁気記録装置における需要継続等の要請に応えるために一層の増加が見込まれる結果、供給量のひっ迫や価格高騰が現実的な問題となっている。以上の状況から、性能を落とすことなく希少な重希土類元素の一部を資源量の豊富な希土類元素で置換して希釈する材料開発や、熱安定性に優れた革新的な低希土類組成の磁石材料の開発が重要な意義を持つ。また、今後も電力エネルギーのひっ迫と高騰が予想される深刻な情勢を踏まえると、モビリティ以外の用途でも誘導モータが主流の工場用動力モータを磁石式モータで置換することによるエネルギー効率向上の重要性も再認識されるため、性能対コスト比が高く産機用途に有利なフェライト磁石の高性能化も有意義な課題である。

一方、軟磁性材料は古くから産業界で多用されており、特に、モータやトランス/インダクタなど電気/電子デバイスでの需要が高く、市場の拡大は止まっていない。モータについては、全世界の電力消費の半分、

日本ではそれ以上を占めると言われているほど電力消費が大きい機器であり、近年の地球温暖化抑制のためのカーボンニュートラルに向けて、デバイスの高効率化は必須である。磁気デバイスの高効率化には、動作周波数の高周波化が極めて効果的であるため、これに用いられる軟磁性材料も対応しなければならない。軟磁性材料における損失は、表皮効果や渦電流の効果により、高周波になるほど大きくなることが知られており、高周波での低損失動作を保つためには、材料におけるこれらの効果の抑制が必要となる。他方、高周波化でもう一つ課題となるのが、周囲の機器への電波障害 (EMI) や電磁両立性 (EMC) であり、無線機器が発展する今日においては、電磁ノイズ抑制技術の発展も急務である。こちらも、携帯電話の5Gに代表されるように高周波化している。電磁ノイズ抑制には軟磁性材料が有効であり、この用途では低損失ではなくむしろ磁性材料の損失が大きいことが求められるが、こちらも損失をいかに高周波領域で発現させるかの高周波化対応が必要である。このように、最新の軟磁性材料の研究開発領域においては、高周波化対応に大きな意義があると言える。

[研究開発の動向]

• 磁石材料

最新の研究開発動向においても、Nd-Fe-B磁石が依然として最も重要かつ先端の材料である。また、ナノコンポジット磁石も概念と可能性が提唱されてから現在まで研究対象になっている。2011年の希土類ショック以降、非希土類磁石および省Nd磁石 (Ce置換磁石) も重要な研究対象となってきた。また、フェライト磁石、1-12型磁石のような課題も、新規な発見もあり、主要研究対象として復活している。

過去10年ほどにわたって各国で行われたプロジェクト型研究の結果から、「非希土類磁石では主用途の主機モータ・発電機用の磁石が作れない」という認識が得られている。永久磁石の新規材料開発に必要な学理的基盤はほぼ確立され、研究開発はその基盤の上に市場の要求特性にかなう材料を迅速に開発する「開発力」強化の側面に重点が移りつつあると言える。それを表す近年の動向として、機械学習や深層学習などの情報数理工学的手法を用いた材料開発加速をテーマとする研究が急速に盛んになっていることが挙げられる。その分野の論文出版数は2016年に対し2021年は約2.4倍に増え、今後もますます盛んになると予想される。我が国においては10年間の元素戦略磁性材料研究拠点 (ESICMM) の成果を産業界と共に発展させる、NIMSと国内の主要なネオジム磁石メーカー4社による磁石マテリアルズオープンプラットフォーム (MOP) が発足し、熱力学データベースや微視的解析などの共通基盤研究を実施している。そこでは、材料組織の予測に使える実効的な熱力学パラメータセットを決めて材料開発に生かす試みなど、産業界側の基盤的競争力強化を主眼に置いたテーマが選ばれ、その中でデータ科学的手法が応用されている。また、近年は情報科学的手法を取り込むマテリアルズインフォマティクスによる材料開発が世界的潮流となり、新たな国家戦略的課題として認識されるに至っている。

2022年に、データ創製・活用型マテリアル開発研究プロジェクトが文部科学省から公募され、NIMSが代表機関である磁性材料研究拠点が採択された。

• 軟磁性材料

人工的な軟磁性材料の歴史は、1900年頃の、鉄にケイ素を添加することで、磁気特性を向上させながら比抵抗も上昇させ、鉄損 (ヒステリシス損失、渦電流損失、残留損失) を抑制できるケイ素鋼 (電磁鋼) 発明から始まった。以降、1910年代のニッケル鉄合金 (パーマロイ)、1930年代から1940年代にかけて、センドラスト、急冷パーマロイ、4%モリブデンパーマロイ、1040合金、スーパーマロイなどのニッケル系合金の発明が続いた。1960年代には、超急冷法などの新プロセスにより強磁性アモルファス合金が登場し、1980年代には、アモルファス合金から派生したナノ結晶磁性体が発見されている。材料特性として見てみると、透磁率に関しては、スーパーマロイの登場あたりからほぼ頭打ちの状況にあり、それ以降は、主に飽和磁束密度や比抵抗などの増加が性能向上を支えてきた。

また、1930年代には、酸化物でありながら軟磁性体となるフェライトも日本で発明され、様々な結晶系（スピネル、六方晶、ガーネット）や組成系（元素置換）、および添加物（焼結助剤等）が検討された。これらの非金属系の軟磁性材料の新発明は、第二次世界大戦前までは海外の研究者が牽引したが、戦後は日本が世界を主導してきた。酸化物系軟磁性体の新ファミリーの発見は、20世紀半ば以降はほぼないと言える。

このように、軟磁性体単体としての組成や結晶構造は、金属系、酸化物系ともども20世紀までに検討され尽くされた感があり、近年は、高周波化対応のために、材料の組成や結晶構造ではなく、既存材料の組織を制御する方向にシフトしている。

高周波化における課題は、ひとつは、軟磁性材料の多くが金属であり、導電性を有するため、表皮効果における表皮深さの減少によって磁束が磁性体内に入りにくくなることや、入った磁束が周波数の二乗に比例する渦電流損失をもたらすことにある。このような効果を抑制するために磁性体を微粒子化し、これを絶縁体との複合体としてマクロな比抵抗を増加させることが行われている。磁性微粒子が絶縁体に分散した系は、1980年代の、磁性ナノ粒子がセラミックのマトリックスに分散したナノグラニューラ軟磁性薄膜として登場し、1990年代には、磁性扁平粉末とポリマー樹脂を混合して成型したシートにおいて、MHz帯で優れた電磁ノイズ抑制効果が得られることが実証されるに至っている。その後は、ナノグラニューラ薄膜が磁性微粒子-樹脂複合材料のコンセプトをベースとして、高比抵抗軟磁性材料の研究開発が続いている。

2000年代は応用先である携帯電話がMHz帯中心であり、かつ、電力も比較的小さかったため、薄膜材料の研究が活発であったが、2010年代後半になると、電力も大きくなり、通信もGHz帯に突入してきたため、薄膜材料よりもデバイスの磁路断面積を稼げる複合材料の研究が活発となっている。

他方、パワーエレクトロニクス分野において、特にメガワットなど電力が高い領域やモータ分野においても高周波化が検討されている。通信用途に比べるとはるかに低いHz帯やkHz帯が主流であるが、電力が高いため、発生する磁束も多く、極めて高い飽和磁束密度と透磁率が求められる。上記の微粒子複合系手法を用いると、磁性体の体積占有率が減少するため、体積磁化と透磁率が減少する。使用する磁束量が多いため、磁路断面積も大きくする必要があるので、薄膜系では対応が困難となる。このことから、この領域では、表皮効果の表皮深さよりも薄い磁性金属箔帯の研究が2010年代から萌芽している。飽和磁束密度が高く安い純鉄を用い、これまでよりも一桁薄い純鉄の薄帯などが提案され、これらを絶縁層を介しながら重ねて、大きな磁路断面積を稼ごうとしている。

ハードディスクの磁気ヘッドなどにも軟磁性薄膜が用いられており、これの高周波動的磁化特性に関する研究も現在地道に行われている。また、非常に古くに発明されたセンダストはピンポイントの組成でのみ優れた軟磁気特性を示すことで知られていたが、薄膜化し原子規則度を制御することで、実はもっと広い組成範囲で軟磁気特性を示すことが示された物性物理的な研究も2022年に登場している。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 磁石材料

ナノメートルスケールのシェル層形成による省希土類高保磁力化技術

高性能モータや発電機には100°C以上の高温でも高い保磁力を持つネオジム磁石が使用され、その実現のためにジスプロシウム（Dy）が使用されてきたことはよく知られている。しかし、2000年代初頭の希土類供給危機を契機にDyを使用しないで高保磁力を得る技術の開発が長年続けられてきた。その結果、Dyを結晶粒界に沿って主相粒子の表層付近の数10ナノメートルの層に濃化させたコア/シェル構造の主相粒子からなる焼結磁石において、希土元素Dyの使用量を最小にしながらも、磁化の低下を抑制した材料を作ることができることが示された。焼結磁石でDyの粒界拡散によりDy拡散層を主相外郭に形成する技術を、サブミクロン径の微細組織に適用できるようにした改良したナノシェル形成技術がNIMSを中心とする元素戦略磁性材料研究拠点（ESICMM）（2007年度第一期開始から2021年度の第二期終了まで）で研究開発された技

術が、現在、世界の研究機関で用いられている。

有限温度の磁気特性シミュレーション技術

有限温度での磁性の定量的な計算は積年の課題であり、さらには、保磁力については非常に挑戦的な課題であったが、ESICMMの電子論グループが原子描像のハミルトニアンを使って、磁化や異方性といった熱力学量の温度依存性や磁場依存性の計算、さらには、磁化反転の緩和時間や自由エネルギー障壁を計算して、保磁力の温度依存性を、人為的なパラメータの設定なしで知ることができる全く新しい手法を開発した。このようなミクロな領域での理論計算の意義は、より大きな領域の計算に用いる連続体描像のマイクロマグネティクスシミュレーションにおいて、有限温度の実効的な磁気パラメータを合わせこむ場合の物理学的根拠を与えることにより、マイクロマグネティクス・シミュレーションを説明ツールとしてではなく、設計ツールとして使っていく新たな展開が考えられる。

深層学習を活用した磁気シミュレーション技術

機械学習にベイズ最適化手法を取り込んでプロセスパラメータを少ない回数の予測-実験サイクルで最適化するアクティブラーニングの手法の有効性は既に知られているが、磁石材料でもその高い実用性がESICMMのなかで実証された。予測ツールの開発と開発現場での活用といった産学連携が目下の有効な活動であり、早期の成果創出が期待されている。

また、深層学習にマイクロマグネティクスに基づく評価を課すことで、複雑なマイクロマグネティクス・シミュレーションを実施せずに高速でシミュレーション結果を予測する新たな手法が提案されている。きわめてコストのかかる大規模なシミュレーションを用いずにその結果を予測する新たな手法として、今後の発展が期待される。

フェライト磁石の高性能化

フェライト磁石はネオジム磁石と市場を二分する重要材料であるが、生産は海外が圧倒的に多く、日本企業としてはプロテリアルとTDKが主要なメーカーとしてハイエンドの高級品を生産しているに過ぎない。国内研究機関からの最先端の学術研究論文も極めて少ないが、最近日本の研究陣によってハイエンドフェライト磁石で添加されているコバルトの性能向上メカニズムが明確に解明され、その制御指針について、基礎学理面での新たな発展が期待されている。

• 軟磁性材料

ナノ結晶磁性体

ナノ結晶磁性体として有名なファインメットは、FeCuNbSiB組成のアモルファス合金を熱処理して、析出した正磁歪のFeSiのナノ結晶の結晶粒界を、負磁歪のFe系磁性アモルファス相が取り巻く構造を形成させた磁性材料である。正磁歪と負磁歪が打ち消し合うことで零磁歪となり、高い透磁率を示すことで知られる。しかし、Feの含有量が75 at.%を超えないため比較的飽和磁束密度が低く、これを改善しようとする研究が活発である。最近、非磁性元素を極力省いたFeBでもナノ結晶磁性体を得ることに成功している例が見られるが、零磁歪からは逸脱しているので、透磁率が思ったように上がらない課題がある。ナノ結晶磁性体は薄帯として利用されることが多かったが、最近、微粒子化させて樹脂との複合材料とすることで、低透磁率化は起きるが比抵抗および高周波特性が向上することを利用した高周波ノイズ抑制シート開発が開発されている。また、高周波インダクタの磁芯に用いる検討も行われている。また、物性物理分野でも、改めてナノ結晶磁性体の損失機構が解析され、磁歪が損失の原因になるとする結果が示された。

フェライト

六方晶フェライトの従来から知られているM型、Y型、Z型、およびW型とは異なる組成において、単相を得る研究が続けられている。汎用性の高いスピネル構造のフェライトについては、Coを添加、もしくはCoフェライトそのものを用いて高周波化する試みが多く行われている。ガーネット構造のフェライトについては、有機金属熱分解法により、高品質の厚膜が得られるようになっており、これらの主用途は磁気光学であるが、ガーネット薄膜を多層化することでフォトニック結晶を得て、高周波デバイスへの応用も展開されており、これも世界的にも日本が先行していると言える。

センダスト

古来の軟磁性材料であるセンダストは、ピンポイントの組成 (Fe-10Si-5Al付近) で軟磁性を示すことで知られ、産業界でも多用されているが、なぜピンポイント組成で軟磁性を示すのか明らかではない部分もあった。このセンダストを薄膜化し、組成探索と熱処理条件の検討を行うことで、原子規則度とAl濃度との関係を解明すると共に、広い組成範囲で軟磁性を発現させることに成功したことが2022年に発表された。スピントロニクス分野での軟磁性層への利用が検討されている。

窒化鉄

最大の飽和磁束密度を有するパーメンジュール (鉄とコバルトからなる合金) を凌駕する可能性が指摘されている窒化鉄についても、最近、次々世代材料として研究が再び活発化しているようである。 α' 相は、高い飽和磁化を示すことが予見されている。 γ' 相は軟磁性相であり、薄膜での物性追求が行われている。

Fe薄帯およびFeSi薄帯

薄膜は、産業界ではコストがかかるものとして未だに敬遠されがちである。また、Coなど高価な元素含まない安価な原料コストも要求される。これを受けて、Feの薄帯についての研究が萌芽している。従来の薄帯の厚みは数十ミクロンであるが、従来よりも一桁薄い厚みにし、これを絶縁体を介しながら積層して体積をえることで高周波対応させようという試みが見受けられる。また、極薄のFeSi薄帯を用いた巻積層鉄芯についても積極的な検討が見られる。

FeB

結晶もしくはアモルファスのFeBに関する研究が活発となってきている。FeB球形微粒子を磁界中で数珠繋ぎとすることで針状とし、形状磁気異方性を付与することで高周波特性を改善される。単結晶球形FeB微粒子でも、これを磁場中で配向させて磁気異方性を付与すると、その磁化困難方向の磁気特性が極めて高周波化することで、30 GHz帯でロスが最大となり、5G携帯電話の電磁ノイズ吸収に使用可能な設計に成功している。

バルク軟磁性材料と軟磁性薄膜とのハイブリッド磁芯

近年の軟磁性材料研究の新展開は、低コストを意識したバルク軟磁性材料の研究が多いことがわかるが、バルク材料の高周波化は低透磁率化を招くため、閉磁路デバイスへ適用しても、漏れ磁束が多くなる。他方、磁性薄膜は、高透磁率を保って高周波化するものがあるため、これでシールドするバルク/薄膜ハイブリッド磁芯の研究が萌芽している。しかし、磁性薄膜も従来の金属系薄膜では比抵抗が不十分で損失を抑えられないため、絶縁物との複相構造であるナノグラニューラ薄膜が用いられる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

2013年に創設された米国のCritical Materials Institute (DOE: Department of Energyが主導)において、多数の企業や大学の連携のもと、2018年からの第2期プロジェクトで永久磁石分野が含まれた形で実

施されている。欧州では2014年から2020年の間、Horizon2020において応用、リサイクル等も含む45の磁石関係のプロジェクトが遂行された。2020年以降はHorizon Europeとなって実施されているが、特に磁性材料の研究開発に焦点を合わせた単独の大型プログラムは遂行されず、磁性材料分野はエネルギー分野などの中で研究が遂行されているようである。そのような状況の中で、ドイツのDarmstadt工業大学とDuisburg-Essen大学が連携した「HoMMage」と呼ばれるプログラム「The Collaborative Research Centre/Transregio (CRC/TRR) 270」がドイツ研究振興協会（DFG）のファンディング（12百万ユーロ）で磁石材料と軟磁性材料分野を主対象として2020年から4年間活動していることが注目される。恐らく次期プロジェクトが計画されると推定されるので、推移を注視する必要がある。

我が国では2012年度から2021年度までの10年間、経済産業省と文部科学省間の連携で進められた「未来開拓」と「元素戦略」両プロジェクトにおいて、それぞれ「高効率モータ用磁性材料技術研究開発組合（MagHEM）」と「元素戦略磁性材料研究拠点（ESICMM）」が実施され、豊富な希土類元素セリウムを用いても高い性能を発現する「省ネオジム磁石」（MagHEM）、究極高性能ネオジム磁石の実現指針と実証（ESICMM）、ネオジム磁石の性能限界を突破する可能性を持つ「1-12型サマリウム-鉄-コバルト化合物」、ボンド磁石用磁粉などの新材料・新物質（MagHEM、ESICMM）などの成果が得られ、今後の社会実装に向けた研究が継続されている。

日本金属学会では、2020年3月にソフト磁性研究会（代表世話人：遠藤恭）が立ち上がり、現在も定期的に研究会を開催している。数百kHzからGHz帯の周波数領域における磁化の動的挙動を学術的に体系化し、ケイ素鋼やソフトフェライトに代わる新しい軟磁性材料の開発指針を示すことが目指されている。電気学会では、基礎・材料・共通部門（A）部門に「マグネティックス技術委員会」（委員長：佐藤敏郎）があり、その傘下の8つの調査専門委員会において、現在は特に、「磁性材料の高周波特性活用技術調査専門委員会」（委員長：直江正幸）、「電磁機器高性能化に向けた電力用磁性材料活用技術調査専門委員会」（委員長：槌田雄二）、「ナノスケールソフト磁性体の創製とデバイス応用調査専門委員会」（委員長：遠藤恭）の3つの委員会（設置順）において、軟磁性材料が調査対象となっており、研究会の実施によって軟磁性材料研究の活性化が目指されている。

文部科学省においては、2021年度に令和3年度革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業が立ち上がり、採択12件の課題の中で、軟磁性材料の研究開発に関わるのは「磁気異方性軟磁性材料を用いた高周波・電力変換用トランス・インダクタの開発」（代表：水野勉）、「革新的パワーエレクトロニクスのための超低損失磁性材料の創成」（代表：岡本聡）、「次々世代パワエレ用高飽和磁束密度窒化鉄の研究」（代表：齊藤伸）の3課題が占める。科学研究費助成事業だけでも、軟磁性材料を取り扱う現在進行中の課題は31件もある。

（5）科学技術的課題

磁石材料の磁気特性の温度変化は小型軽量高出力なモータにおいて大きな課題であり、それを軽減するためにはキュリー温度が高く電気抵抗も高い材料の実現が望ましい。現在はネオジム磁石のキュリー温度を高める元素として希少元素であるコバルトが少量使用されている。渦電流による磁石自体の発熱を低減するために、材料の電気抵抗を高めることが有効であるが、良い方法がないため、磁石を分割して絶縁層を挟む手法が用いられている。絶縁層を内在させて高性能を維持した材料の開発は積年のテーマであり、今後挑戦されるべき研究課題である。

さらに、キュリー温度が高く鉄を主成分とする新規な磁石材料の探査も継続していく必要がある。現在は1-12型と呼ばれるThMn12型結晶構造のRFe12系化合物のNdFe11TiNおよび(Sm-Zn)(Fe-Co-M)12系化合物が知られているが、磁石材料としての性能はネオジム磁石に匹敵するところまで到達していない。その原因は構造安定化のためにFeを置換して添加される安定化元素により飽和磁束密度の低下が著しいこと

にある。これらを解決するためには「M」を多成分化して相平衡を改善する研究が必要であり、磁化の大きな低下を招くことなく高保磁力を発現する多元組成を見出すことができれば、大きなインパクトが期待できる、磁石材料探査における技術課題の一つである。

フェライト磁石においては、高性能化のためには磁気異方性を高めるCoの添加が重要技術であり、近年の研究により、Coが主相の5つのFeサイトの特定の1つを置換する必要があることが判明し、その傾向を増強する経験的指針が得られている。この知見の物理学的根拠を明確にし、材料開発に適用することが、性能対価格比でネオジム磁石と競合できる唯一の素材であるフェライト磁石における技術課題の一つであり、新規高性能フェライト磁石の開発により一定の市場でネオジム磁石の代替が進む可能性が期待できる。

上述の磁性材料における技術課題の解決は材料組織の厳密なコントロールにより初めて発現する。永久磁石においては本質的にナノメートル領域の組織制御が必要であり、わが国はその先端を走っているが、優位性の維持とともに、バルク磁石内部のより高感度高分解能さらに高効率な磁気情報の取得・解析技術の開発が課題である。今後の課題はそれらから得られる膨大で顕微鏡画像データや計測データをデータ科学的解析に適合するようにフォーマットし、次の材料開発を飛躍的に加速する研究手法を開発するデータ活用型研究開発の領域にあると考えられる。

また、材料プロセス設計に必須の基盤的な情報源である熱力学データベースの構築は過去10年間の元素戦略磁性材料研究拠点(ESICMM)により進められ、世界的に見て希少で正確なデータベースがNIMSに構築された。それは磁石MOPでの産学連携研究の資源となっているが、実際の磁石材料開発と早期の生産に結び付けるには、さらに継続した努力が必要である。情報科学的手法や電子論計算も駆使して新規材料から部材製造までの開発研究を支援し、製品化までの期間を大幅に短縮する取り組みが、地味ではあるが、重要な課題である。有限温度での安定性の理論予測には格子振動効果を取り扱う必要があり、さらに、磁性への影響の理論計算などの第一原理計算分野では、有限温度の理論手法の開拓がここでも重要になる。

軟磁性材料は、大きく酸化物(フェライト)と金属に分けられる。金属磁性材料は、直接相互作用によるフェロ磁性によって磁化が大きく、優れた高周波特性が期待できるが、低抵抗であるため、高周波対応させるためには微粒子化や薄帯/薄膜化する必要がある一方で、デバイスにおける磁路断面積が小さいと電子部品中の磁気回路においてリラクタンスが増加し、実効透磁率が小さくなってしまいうというジレンマがある。一方、セラミックスであるフェライトは高抵抗であるため、バルク形状でも利用可能であるが、磁性の起源が超交換相互作用によるフェリ磁性であり、磁化が金属系よりも小さいため、そもそも高周波では大きな初透磁率が得られない。また、高抵抗であるが絶縁体とまでは言えないため、動作環境温度が高温化すると、比抵抗が低下して損失が増える。この一長一短で限定的な性格は、多くが絶縁体であり、常誘電体であっても真空と有意差のある誘電率を発現する誘電材料と比較した場合にも不利となり、特に超高周波分野では、磁界ではなく電界を用いたデバイスが先行している。磁性体の場合は、常磁性体の透磁率が真空と優位な差がないため、強磁性体以外を磁気デバイスに用いることはできない。しかし、電気・電子デバイスには、絶対に磁界制御が必要となる用途も多く、これまでよりも高い性能を持った新規組成・新規微細組織の材料開発は不可欠である。磁性薄膜の用途は限定的であるが、高周波特性を向上させるには薄膜は有利であるため、「この薄膜でなくてはなし得ない」といった高性能薄膜材料の開発が望まれる。

計測技術の発展も必須である。高周波での透磁率計測については、20 GHz程度までは絶対値まで信用できる計測技術が市販に至っているが、それ以上の周波数に対しては、薄膜においては基板、複合系バルク材料においては樹脂の誘電率が、治具の電氣的な共振周波数の低下を招き、計測が難しくなる。また、これから高周波化されるパワーエレクトロニクス分野においては、高周波で大振幅の磁界を印加しながら透磁率を計測できる装置が少なく、現状では10 MHz程度である。また、高周波での磁性材料の磁化機構を解釈するために多用されるLandau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式は、あくまでも磁性体内部の磁化ベクトルに対して、それに直交する方向に小振幅の交流磁界が印加された場合に成立するものであって、この交流

磁界の振幅が強くなり、非線形特性を考慮しなければならなくなると、LLG方程式は広く知られる単純な形ではなく、高次の項が付与されるなど、複雑になっていくものと考えられる。この辺りの物性研究の進展も必要である。

(6) その他の課題

マルチスケール・マルチアスペクト組織解析に用いる最先端の分析機器の更新、維持に多大な経費が必要である。また、データ創製活用型の材料開発研究では実験データの構造化と集積管理、言語データ処理によるデータマイニング、画像データからの情報抽出および材料特性との関連付けとデータベース化、逆問題として、所望の特定特性を有する材料組織とその実現のためのプロセス条件を予測する技術の開発などが強化すべき課題であり、特に材料開発側とデータサイエンス側の研究者間の連携促進が重要な課題である。膨大なデータはクラウド上のデータベースに保管される場合が多いと想定され、その維持や、通信の地政学的安全性・安定性など、材料開発とは別の課題や体制整備の必要性があると思われる。

産業界とアカデミアの意識や認識の乖離も問題である。例えば、産業界では、薄膜よりバルク、CoやNiよりもFeというように、市場規模の大きな汎用軟磁性材料には低コストであることが求められるが、アカデミアの磁性材料研究者は物性の追求に興味集中しておりコスト意識が高いとは言えない。また、産業界では、薄膜は製造装置やマシンタイムによりコストが高いと思われるがちであるが、原料の使用量はバルクと比較すると圧倒的に少なく環境負荷が低いという意識が薄い。

軟磁性材料の応用先である電気電子回路系研究者と軟磁性材料研究者との研究者間でも意識や知識の乖離も見られる。およそ1 MHzを境に、用いることができる磁性材料の磁化機構が変わることも含め、高周波になるほど透磁率が低下することが回路系研究者に広く浸透しているとは言えない。このような意識の食い違いの無いよう、材料と他分野とのマッチングが重要性である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	永久磁石材料の基礎研究は10年間の「元素戦略〈研究拠点形成型〉」により活性化、世界でもトップクラス。NIMSと国内磁石メーカーとのオープンプラットフォーム型連携研究が2022年4月から開始されている。
	応用研究・開発	◎	→	モータ設計と材料開発当事者企業間の連携によるHEVへの新型モータが搭載された車の事例あり。EV駆動モータおよび発電機、電動アクスルやロボット用モータなどでの日本企業の競争力は依然として高い。
米国	基礎研究	○	→	DOEによるCMIがAMES研究所拠点として全米規模で希少元素代替技術の広い研究分野を対象に継続。レアアースフリー、非希少レアアース磁石などにフォーカスした結果、特に画期的な成果はない。
	応用研究・開発	○	→	モータに関する研究は盛んにおこなわれており水準も高い。材料プロセスでは3Dプリンティングによるアディティブ・マニファクチュアリング技術の開発が行われている。
欧州	基礎研究	◎	→	ドイツのDarmstadt工業大学とDuisburgh-Essen大学を中心に幅広い研究を実施している。シミュレーション分野では、いくつかは依然として世界トップレベル。欧州委員会の長期的視点に立った施策で元素リスクやリサイクルに関する調査研究等の活動が支援され。
	応用研究・開発	◎	→	ニッチな新規用途の開拓に力点が置かれている。

中国	基礎研究	◎	↗	基礎研究分野でも大学等の研究設備面ではほぼ日欧米と同等。研究人口では圧倒しており、研究の質は着実に向上。研究テーマは、実用的・現場的なものが多く、突出したレベルには至っていないが、総合的に見れば脅威と言える。
	応用研究・開発	◎	↗	モータの電磁気設計等の研究数は非常に多い。その中から斬新なものが生まれる可能性があり、脅威ととらえるべき。
韓国	基礎研究	○	→	韓国における磁石の研究は比較的長い歴史を持つが、多くが日本の後追いになっている。
	応用研究・開発	○	↗	研究事例は中国に次いで多い。
その他の国・地域 (任意)	基礎研究	○	→	欧州以外では、ロシアは伝統的に希土類磁石の研究には高水準の研究があり、ロシア科技大学などの実力ある研究機関がある。研究成果は欧米雑誌には多数が出てこないようである。
	応用研究・開発	△	→	永久磁石モータなどの論文件数ではインドは常にランキング上位10内にあるが特に新規な発明はないと思われる。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

- 1) Seiji Miyashita, et al., “Atomistic theory of thermally activated magnetization processes in Nd₂Fe₁₄B permanent magnet,” *Science and Technology of Advanced Materials* 22, no. 1 (2021) : 658-682., <https://doi.org/10.1080/14686996.2021.1942197>.
- 2) 加藤晃他「Material DXを用いた省Nd磁石の開発」『あたりあ』60巻1号(2021) : 57-59., <https://doi.org/10.2320/materia.60.57>.
- 3) Guillaume Lambard, et al., “Optimization of direct extrusion process for Nd-Fe-B magnets using active learning assisted by machine learning and Bayesian optimization,” *Scripta Materialia* 209 (2022) : 114341., <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.114341>.
- 4) George Em Karniadakis, et al., “Physics- informed machine learning,” *Nature Reviews Physics* 3 (2021) : 422-440., <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5>.
- 5) T. Schrefl, et al., “HOM-07 Physics informed neural networks for computational magnetism,” 15th Joint MMM-Intermag Conference (January 10-14, 2022), <https://magnetism.org/past-conferences/>, (2023年1月5日アクセス).
- 6) Hiroyuki Nakamura, et al., “Co site preference and site-selective substitution in La-Co co-substituted magnetoplumbite-type strontium ferrites probed by ⁵⁹Co nuclear magnetic resonance,” *Journal of Physics: Materials* 2, no. 1 (2019) : 015007., <https://doi.org/10.1088/2515-7639/aaf540>.
- 7) Mohamed A. Kassem, et al., “Bismuth substitution at the strontium site in the magnetoplumbite-type Sr ferrite: Phase stability, structure, and magnetic properties,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 560 (2022) : 169603., <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169603>.

- org/10.1016/j.jmmm.2022.169603.
- 8) 佐久間秀「愛知製鋼、高回転モータを生かす減速比21.8を実現した小型高減速機搭載「EV向け次世代電動アクスル」実証に世界初成功」Car Watch, <https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/1387490.html>, (2023年1月5日アクセス).
 - 9) 榎本裕治他「国際高効率規格IE5レベルを達成したアモルファスモータ」『日立評論』06-07 (2015) : 50-55.
 - 10) Xin Tang, et al., “(Nd,La,Ce) -Fe-B hot-deformed magnets for application of variable-magnetic-force motors,” *Acta Materialia* 228 (2022) : 117744., <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117747>.
 - 11) fabiodisconzi, “H2020 projects about “magnet”,” <https://www.fabiodisconzi.com/open-h2020/per-topic/magnet/list/index.html>, (2023年1月5日アクセス).
 - 12) Technische Universität Darmstadt, “CRC/TRR 270 - Hysteresis design of magnetic materials for efficient energy conversion,” https://www.tu-darmstadt.de/sfb270/about_crc/index.en.jsp, (2023年1月5日アクセス).
 - 13) 元素戦略磁性材料研究拠点 (ESICMM)「About ESICMM」<https://www.nims.go.jp/ESICMM/about/index.html>, (2023年1月5日アクセス).
 - 14) 国立研究開発法人物質・材料研究機構 (NIMS)「物質・材料研究機構 (NIMS) と磁石メーカー4社による磁石マテリアルズオープンプラットフォームの発足」<https://www.nims.go.jp/news/press/2022/05/202205300.html>, (2023年1月5日アクセス).
 - 15) 本田技研工業株式会社「重希土類完全フリー磁石をハイブリッド車用モーターに世界で初めて採用」<https://www.honda.co.jp/news/2016/4160712.html>, (2023年1月5日アクセス).
 - 16) 高効率モーター用磁性材料技術研究組合 (MagHEM)「高効率モーター用磁性材料とモーター設計」新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), <https://www.nedo.go.jp/content/100947797.pdf>, (2023年1月5日アクセス).
 - 17) 山本真史他「自動車用モータの技術動向」『デンソーテクニカルレビュー』23巻 (2018) : 37-44.
 - 18) 日本電産株式会社 (NIDEC)「モーターとは」<https://www.nidec.com/jp/technology/motor/>, (2023年1月5日アクセス).
 - 19) Ames National Laboratory, “Critical Materials Institute,” <https://www.ameslab.gov/cmi>, (2023年1月5日アクセス).
 - 20) Thomas Schrefl, “Thomas Schrefl,” Google Scholar, <https://scholar.google.com/citations?user=XehtsQEAAA&hl=ja>, (2023年1月5日アクセス).
 - 21) Richard F. L. Evans, “Richard F L Evans's profile,” University of York, <https://www.york.ac.uk/physics/people/physics-staff-richard-evans/>, (2023年1月5日アクセス).
 - 22) KU Leuven, “Horizon 2020: DEMETER,” <https://www.kuleuven.be/english/research/EU/p/horizon2020/es/msca/itn/demeter>, (2023年1月5日アクセス).
 - 23) Osamu Takeda and Toru H. Okabe, “Current Status on Resource and Recycling Technology for Rare Earths,” *Metallurgical and Materials Transactions E* 1 (2014) : 160-173., <https://doi.org/10.1007/s40553-014-0016-7>.
 - 24) Jasmin Werker, et al., “Social LCA for rare earth NdFeB permanent magnets,” *Sustainable Production and Consumption* 19 (2019): 257-269., <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.07.006>.
 - 25) Braeton J. Smith, et al., “Rare Earth Permanent Magnets - Supply Chain Deep Dive Assessment,” US Department of Energy, <https://doi.org/10.2172/1871577>, (2023年1月5日アクセス).