#### 内外 BM 技術動向

専務理事 大森賢次

BM News66号で AIP Advances に掲載された第65回 Magnetism and Magnetic Materials 国際会議の論文を紹介したが、後日報告となった分があったので追加して紹介する。

ま た、2021INTERMAG が 2021 年 4 月 26 日から 30 日に掛けて開催された。IEEE に 掲載された Abstract を参考に個人的に興味 あるものを紹介する。

### AIP Advances 掲載分:

University of St. Thomas (USA) の Calascione らは、磁性エラストマー材料の 性能を調整する具体的な手段として、後処理 なしの 3D プリント構造体を介してこれらの材料 の異方性を調整できることを実証した。磁気エ ラストマーの性能を最適化する方法として、磁 気熱処理法などで微細構造を制御する方法な どが用いられてきた。また、異方性を導入する 方法としては、熱溶解積層法 FDM (Fused Deposition Modeling) があり、柔軟性のな い印刷部品の磁気異方性を操作することは示さ れてきたが、柔軟な複合材料の場合は、さらな る加工上の課題があるため、まだ検討されてい ない。ここでは、熱可塑性ポリウレタン(TPU) ポリマーと鉄、カルボニル鉄、またはマグネタイト 微粒子のいずれかを用いて印刷で FDM 構造 体を作製した。磁気特性に対するさまざまなパ ラメータの相対的な影響を調べるため、アスペク ト比、充填率、および充填方向を変えて、各 材料タイプを組み合わせた一連の試料を印刷し た。振動試料型磁力計(VSM)を使用して 磁気ヒステリシスループを求め、試料間の帯磁 率を比較した。その結果、FDM はポストプロ セスを必要とせず、磁気熱処理の方向性を実 現する方法を提供し、その代わりに部品の内 部構造の異方性によって現れることが実証され た。そのため、この概念は充填率磁気焼きな まし(IMA)と呼ばれている。これらの変数が、 調整可能な磁気応答の連続体を形成している ことがわかった。さらに、選択した微粒子は、そ

の磁気的サインを複合材料に伝達する。全体として、3Dプリントした磁気エラストマー構造を高度にカスタマイズ可能で微妙な特性により、磁気アクチュエーションやソフトロボティクスなど、新たな磁気メカニカル用途への幅広い応用が可能になると考えられる。

**Department of Materials Science** and Engineering, NTNU (Norway) の Kiarie らは、化学組成が同じでアスペクト 比が異なる磁性粒子が、磁気粘性エラストマー (MRE) の実効的な磁化応答に及ぼす影響に ついて検討した結果を報告した。 MRE は、非 磁性高分子マトリックス中に高透磁率粒子を分 散した複合材料であり、その磁気弾性特性の 調整が可能である。外部から磁場を印加する と、剛性などの機械的性質が変化する、いわ ゆる磁気レオロジー (MR) 効果がある。これ は磁性フィラー粒子間の磁気的相互作用に起 因している。MR 効果にはいくつかの要因が大き く影響する。それらは、ポリマーマトリックス、磁 性粒子の体積分率、サイズ、および形状であ る。連続体定式化の理論に基づき、有限要 素解析(FEA)を用いたマイクロスケールモデリ ングにより、形状が MRE の巨視的磁化に及ぼ す影響を明らかにした。Jiles-Atherton ヒステ リシスモデルのパラメータを用いて、FEA ソフトウェ ア COMSOL Multiphysics で MRE のヒステリ シスループを数値的に解像した。モデル計算は、 粒子の体積分率が一定(φ = ~ 20%)で、 粒子のアスペクト比が変化(AR=1, 2.5, 5, 7.5) するランダム配向(非配向) および配向 ミクロ構造に対して行った。計算機による均質 化スキームを用いて、これらの複合材料のミクロ な挙動とマクロな特性の関連付けを行った。解 析の結果、無配向 MRE では、粒子のアスペ クト比が増加するとともに有効磁化が増加、特 に線形領域で増加することがわかった。一方、 飽和磁化は粒子形状に依存しないことが分かっ た。この効果は、印加磁場に沿って配列した粒 子でより顕著である。一方、印加磁場に垂直 に配列した粒子では、アスペクト比の増加により 印加磁場に対して磁化が減少する逆の効果が 見られた。

Beijing University of Technology(中国)のZhangらは、最も一般的な軟磁性相(α-Fe)よりも硬度が高いFe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub>を用

いて、SmCo<sub>5</sub>/Fe-Si ナノコンポジット磁石を合 成し、そのナノ化プロセスについて検討した。ナノ コンポジット磁石は、理論的に得られる超高磁 気エネルギー積とレアアース資源の節約を実現 するため、注目されている。Fe-Siは12時間ボー ルミル処理することで SmCos マトリックスによく 分散し、SmCo<sub>5</sub>/Fe-Si ナノコンポジット中に微 細かつ均一な粒状で現れ、軟磁性相として適 していることが分かった。Fe-Si 相のナノ化プロ セスは、不規則な形状の凝集から、長い鎖状 になり、最終的に粉砕時間の増加とともに Fe-Si 粒子が均一化しすぎたと要約される。その結 果、SmCo<sub>5</sub>/Fe-Si ナノコンポジット磁石は残 留磁束密度 9.5 kG、保磁力 8.2 kOe で最 適な最大磁気エネルギー積は 14.3 MGOe と なった。この結果は、軟磁性相として硬度の高 い Fe-Si を用いることで、調製したナノコンポジッ ト磁石は良好な特性を持つだけでなく、より機 械特性の近い2相であるため調和変形が期待 できることを示している。

## Toshiba Corporation の Kinouchi らは、

磁気異方性を有するアモルファス Fe-Co-B-Si 磁性薄片を含む軟磁性複合材料(SMC)における電磁気的特性を調べた。3軸方向の透磁率,コアロス,電気抵抗率を測定した結果、透磁率は3軸方向で異なり、コアロスは内部の薄片の扁平面に垂直な方向で他の2方向より大きかったが、電気抵抗率が比較的高いため、用途としては許容範囲内であることが予想された。この論文は、このようなSMCが3次元磁気異方性と低コアロスを持つことを示す最初の直接的証拠である。

Aristotle University(Greece) の Sempros らは、 $Sm_{1-x}$   $MM_x$   $Co_{5-y-z}$   $Fe_y$   $Ni_z$  (x = 0 - 0.7; y = 0.5 - 1.5; z = 0.5 - 1) という公称組成の一連の化合物の予備実験と第一原理計算結果を紹介した。MM 含有量が 50% までの化合物では、一軸結晶磁気異方性を保持した  $CaCu_s$  型構造で合成することができた。磁化値は 85 から 50  $Am^2/kg$  の範囲にあり、Ni 含有量は磁化を弱める代わりに構造の安定化に重要な役割を果たしている。理論計算ではより高い磁化値が予測され、特に  $SmCo_{2.5}Fe_{1.5}Ni$  化合物の場合、 $SmCo_5$  に近い値が得られると予想される。

# BM インフォメーション

IEEE 掲載分:

NOVATEM(France) の Giraud ら は、 電気機械に使われる積層鋼板の接合におい て、接合剤として鉄粉末を含んだ接着剤を使 うことを試みた。鉄粉末としては水アトマイズ粉 と一酸化炭素還元粉を用いた。水アトマイズ 粉を 75% 含んだエポキシ樹脂を用いて接合 した積層鋼鈑で周波数 400Hz、1000Hz、 5000Hz、磁束密度1T、2Tでの鉄損およ び透磁率はエポキシ樹脂のみに比べて大きな改 善が得られた。一方、一酸化炭素還元粉の 場合は、粉末に空孔があるためか、鉄損はエポ キシ樹脂のみに比べて改善が見られたが、透磁 率の改善は見られなかった。いずれも熱伝導率 改善には効果が見られた。しかし, 予備的な結 果であり再現性試験を含むより詳細な測定で 確認する必要がある。

Portland State University (USA) Wong らは、同軸磁気歯車(MG)は適切な半径を有し、半径方向のパラメータスイープ解析を適切に行うことで、高トルク密度かつ高ギア比で動作させることができることを指摘した。MGは、従来は10:1以下の小さなギヤ比で高い体積トルク密度を発生できると考えられてきた。ギア比33:1の設計例を紹介し、3D有限要素解析により300 Nm/Lを超えるトルク密度を計算した。また、ハルバッハロータ MGと表面実装型永久磁石 MGとのトルク密度の比較も行った。

Shenyang University of Technology(中国)のTongらは、4つの分割ロータ構造(軸方向に分割したスリーブ、周方向に分割した PM、 本のの分割した PM、 スリーブと PMをそれぞれ軸方向と周方向に分割したもの)が回転子渦電流損失 (RECL)に及ぼす影響を3次元有限要素解析 (FEA)で検討した。高速の表面実装型永久磁石 (PM) 同期モータでは、RECLが非常に大きく、低減するためのさまざまな方法がある。これに基づいて、異なるスリーブ材料を用いた RECL 放熱に対するローター分割構造の適用性を分析した。また、C-core実験により、異なる分割型ロータ構造の RECL に対する抑制効果を検証した。

Southeast University(中国)のLiらは、 従来の軸流磁束永久磁石発電の電磁気的性 能を改善し、直接駆動波力エネルギー変換の要求を満たすために、新しいハイブリッド励磁軸流磁束永久磁石発電(HE-AFPMG)を提案した。HE-AFPMGの構成について紹介し、次に、開路磁場分布に基づく動作原理と磁場変調の定性的解析について述べた。最後に、無負荷および負荷条件下での電磁気的性能を分析した。また、発電機への電気的励磁の影響も調査した。これにより、発電機の妥当性が検証され、優れた磁場制御能力が確認された。その結果、電気励磁の付加は逆起電力の高調波成分を低減させるだけでなく、負荷トルクの範囲を広げることができることを証明した。

Univ. Lille(France) の Vincent らは、磁 性部品の積層造形を検討した。積層造形技 術は、早期に実働するモデルを製作できること と、部品設計に有益な多様な形状を可能にす ることで知られている。3D 印刷に使用される材 料は、当初は高分子材料が中心だったが、最 近では、複合材料を原料として金属やセラミック スの 3D 印刷を可能にするために、より複雑な 材料が使用され始めている。フィラメントを用い た積層造形プロセスについて紹介し、製造した コアの一部について磁気特性を評価した。また、 ペレット状の材料を用いた印刷プロセスも検討し た。ソフトフェライト磁性を考慮して印刷物のモ デリングを行った。トロイダル・インダクタの損失 を計算し、透磁率に及ぼす温度の強い影響を 考慮した。次に、材料密度と関連した透磁率 の変化を調べた。その後、3D 印刷によって実 現したトロイダル・インダクタの起伏のある形状を 例として透磁率に対する密度の影響に関するモ デリング結果を検証するために、磁気特性の実 験的評価を実施した。

Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics(ロシア)の Shiryaev らは、フレーク状のセンダスト(Fe-Al-Si 合金)粉末粒子を充填した複合材料のマイクロ波透過係数の周波数依存性を測定し、磁気損失ピークの出現をもたらす物理的メカニズムを決定するための手法を提案した。外部磁場下で得られたマイクロ波透磁率のデータの解析から、外磁場がない場合の固有透過率を正しく求める混合則は、磁気バイアス下では有効でないことを示した。測定データに基づき、損失ピークの出現に至る物理的なメカニズムを明

らかにし、磁気バイアス下での混合則の無効性を説明した。その結果、磁気損失の主なピークは Polder-Smith モードに起因することが示された。外場が増加すると、磁区構造が消失し、粉末粒子間の相互作用が増加する。バイアス下の透磁率は、介在物間の相互作用を考慮した混合則で記述する必要がある。発見したPolder-Smith モードの周波数は、透磁率データとよく一致した。

Shenyang, University of Technology(中国)のXiaoらは、電力変圧器の発生漂遊損失と温度を低減するための磁気シャント設計を調査し、最適化した。まず、2次元モデルを確立し、異なる構造のシールドの漏れ磁束分布を比較・分析し、さらにOSFPSZ-200kV A/230kV 電力変圧器をベースに、異なるシールド構造による漏れ磁束分布の影響を考慮して、3次元 FEM モデルを確立した。安全運転に必要な最適なシールド構造を得るため、電界回路結合法を用いて電力変圧器の漂遊損失と温度を計算した。また、三相電力トランスの迷走損失と温度のシミュレーション結果を、異なるシールド構造の下での実験結果によって検証した。

Shenyang, University of Technology(中国)のXiaoらは、電力 用変圧器の構造部品(プルプレート,クランプ等) の損失について, 異なる高調波条件下で解析 的・実験的に検討した。大型電力変圧器の 損失(タンク,構造部品,シールドなど)をい かに効果的に制御するかは, 電力変圧器の製 造コスト削減やネットワーク運用の安全性確保 に大きく寄与している。まず、異なる材料(ケイ 素鋼板、非磁性鋼、鋼)の異なる周波数で の B-H、B-P、透磁率曲線を測定した。次に、 解析的手法に基づく電力変圧器の損失計算モ デルを構築し、同時に、有限要素法を用いて 異なるシールドの下での構造部品の損失を計算 した。最後に、提案したシミュレーション結果の 正しさを検証するために、実験的研究を実施し た。

Chung-Ang University(韓国)のZaid らは、より高いトルク密度を達成するために、追加的な内側固定子を持つ内側永久磁石同期機を提案した。電気機械においてより高いトル

# BM インフォメーション

ク密度を達成するために、いくつかの新しい設計 や技術が文献に掲載されている。高いトルク密 度は、通常、機械の効率や力率を低下させる という代償を払うことになる。追加固定子の採 用には、いくつかの問題がある。まず, 温度上 昇の問題については、カップ型ロータを用いて内 側固定子鉄心の排熱を行うことで対応した。ま た、同じ理由で内側のステーターの電流密度も 低く抑えられている。そのため、内側と外側の固 定子巻線に電流を流すために、定格電流の異 なる2つのインバーターを使用した。固定子が 増えることによる鉄損の増加(効率の低下)の 問題は、固定子鉄心をケイ素鋼板からアモルファ ス材に変更することで解決した。従来のシングル ステータ機と、ケイ素鋼板とアモルファス材料を用 いた提案のデュアルステータ機を、2D-FE 解析 により解析・比較した。3つの機械の逆起電力、 出カトルク、損失、および効率を比較した。そ の結果、アモルファス材をコアとする提案型デュ アルステータ機は、効率を下げることなく、トルク 密度を大幅に向上できることを示した。

Shenyang University of **Technology(中国)のZhangらは、**トラ クションシステムの容積を最小化するために、物 流用電気自動車 (EV) の従来のラジアル磁 東型永久磁石同期機 (RFPM) の代替となる 軸流形永久磁石同期機(AFPM)を設計し、 最適化を検討した。 AFPM はディスク型とも呼 ばれ,70年代に初めて発表された。それ以来, AFPM は従来の RFPM に比べてコンパクトな構 造,効果的な熱管理,高いトルク密度により, 多くの研究が行われてきた。AFPM は同様のエ ネルギーを伝達するためによりコンパクトな体積 を有し,新たな自動車用途として有望視されて いる。その結果、AFPM は同じ出力性能を得 るために、体積と重量を大幅に削減できることを 明らかにした。主に AFPM のトポロジー選択と パラメトリック設計、製造技術、および最終最 適化結果解析の3つの側面について紹介した。 より高いスロットフィリングファクターを得るための ストラップワイヤー設計とスタンピング技術により、 AFPM のプロトタイプを製作し、検証のためのテ ストを行った。その結果、従来の RFPM と比較 して、銅線の充填率が78%から88%に増 加し、鉄芯の長さが 180mm から 99mm に 減少していることを実証した。解析、シミュレー ション、実験により、物流 EV における従来の

RFPM に代わる AFPM の実現可能性を検証した

LTI (Laboratoire des Technologies Innovantes), Amiens, FR Ø Préscillia Dupontらは、GOES サンプル の磁気挙動を一方向磁場 (Single Sheet Tester (SST)) と回転磁場 (Rotational power loss Single Sheet Tester (RSST)) で測定した。次に、異なるレーザー 処理(照射、スクライビング、及び超短パルスレー ザーによるアブレーションと呼ばれる新しいレー ザー処理)が1次元、2次元、及び回転磁 気損失に与える影響を比較し、議論した。電 気機器(トランス、大型オルタネータ)の高効 率化は世界的な目標であり、その実現に貢献 する方法として、磁心内の軟磁性材料の鉄損 を低減することが挙げられる。軟磁性材料、特 に粒状配向電気鋼(GOES)の特性向上は、 表面レーザー処理によって可能であり、古典的 には圧延方向(RD)に平行な交番磁場に対 して得られるものである。しかし、磁束線は必ず しもこの好ましい方向と平行ではなく、回転する こともある。 横方向 (TD) に平行な回転磁場と 交番磁場下でのレーザー処理された GOES の 挙動の検討は、まだ少なく、さらに調査する必 要がある。目標は GOES のベクトル挙動を最 適化することである。一方向性磁場と回転性 磁場の両方において、いくつかのレーザーのパラ メータセットといくつかの偏光 / 周波数条件にお ける電力損失低減が報告されている。最後に、 回転損失と平均交流損失の違いについて簡単 な解析を行い、軟磁性材料の特性評価におい てRD-TD 結合損失寄与を含む2次元ベクト ル磁気特性を使用することを提案した。

Nanjing University of Science and Technology(中国)Wan らは、固定子に非磁性体フィラーを用いたスロットレストロイダル巻線高速永久磁石同期モータ(HSPMSM)を紹介した。高周波ロータ渦電流損失,鉄損,トルクリップルを抑制し,巻線の固定性,熱伝達を改善するために,トロイダル巻線と非磁性フィラーを用いたスロットレス構造を選択した。燃料電池用エアコンプレッサの高速モータは,高出力密度・高効率が要求される。まず、基本的なトポロジー選定を紹介し、次に、遺伝的アルゴリズムと電磁界の有限要素解析に基づく多目的

最適化プロセスについて考察し、15kW、12 万回転の HSPMSM の出力密度と効率の最適 な妥協点を見つけることを目的として実施した。 最終的に、一般的なスロット付き HSPMSM 方式よりも高い電力密度と効率を示す最適設 計方式を選択した。