

TODAY

**理事長就任の御挨拶**

一般財団法人 金属系材料研究開発センター

理事長 小野山 修平（日本製鉄株式会社 代表取締役副社長）

この度、当財団の理事会において、理事各位のご推挙により理事長に就任いたしました。当センターは、1985年に創立され、我が国の素材産業において様々な課題に世界に先んじて取り組み、業界の発展に大きな貢献をしてまいりました。これまでの間、当センターの運営と発展に尽くされた諸先輩並びに会員各位に深く敬意を表します。

はじめに、昨年千葉県を襲った大型台風、未曾有の豪雨災害で被災された方々、新型コロナウイルスの感染拡大により今尚、生活に大きな悪影響を受けられている皆様に、心よりお見舞い申し上げます。

さて、近年、世の中は「地球温暖化」、「IT革新」が一層進むと共に、高齢化・少子化による生活スタイルの変化が進みつつあり、これに伴い金属材料産業でも「素材」と「プロセス」両面での変革が始まっています。

「素材」については、我が国の科学技術基本計画掲げられた Society5.0 の実現、イノベーションによる社会の改革をめざした開発が着実に進みつつあり、新しい社会を支えていく金属産業においても IoT 技術などを活用した新たな材料設計技術、材料製造技術が求められつつあります。IT化が加速しており、自動車や物流など輸送システムの分野で「次世代技術」として議論されてきた MaaS、CASE などは確実に要素技術ごとに実現され始めていくと考えています。更なる車体の軽量化を実現するハイテン化の促進やマルチマ

テリアル化など「素材」分野として水平連携を進めるとともに、他分野である資源、ユーザー、IT 産業との垂直連携によって、そのポテンシャルを大きく広げていきたいと考えております。

「プロセス」については、気候変動枠組条約第 25 回締約国会議、COP25 で協議されました二酸化炭素排出削減等の環境問題が世界規模で大きく取り上げられ、我々、金属産業界の果たすべき使命もより大きいものとなっています。これらの諸課題に技術開発の面から積極的に対応し、国際的競争力を保ちつつ、金属産業の継続的な発展に寄与していかなければなりません。

当センターでは、「超高压水素インフラ本格普及技術」「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術」「未利用熱エネルギー革新的活用技術」「鉄鉱石の劣質化に対応した革新的省エネプロセス」など、地球温暖化、資源問題、水素社会の実現など、我が国のみならず世界的にも重要な課題に多数取り組んでおり、当センターが果たす役割は非常に大きいと考えております。

これらの企画・推進を更に進めていくことで当センターの重要な役割を着実に果たしていきたいと思っております。

皆様のご支援を受けながら、金属材料の社会貢献を今まで以上に見える形にするため、経済産業省を始めとする関係機関としっかりと連携し、進めて参りたいと存じます。

高効率モーターの技術動向

一般財団法人金属系材料研究開発センター 磁性材料研究部長 豊田 俊介
 高効率モーター用磁性材料技術研究組合 主席研究員 谷川 茂穂

1. はじめに

地球温暖化抑制のため、エネルギー効率の向上、燃料の転換、再生エネルギーの利用拡大等に世界的に大きな期待が寄せられている。自動車の燃費規制は年々厳しいものとなっており、これに対応したモーター駆動の電動自動車の割合が年々増大している。家電や産業機器の分野においても、トップランナー方式による規制など、各国・地域でモーターのエネルギー効率規格が厳格化されてきている。

高効率モーター用磁性材料技術研究組合 (MagHEM) では、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託 (JPNP14015) により、2016 年度までを第 1 期、2017 年度からを第 2 期として、効率の高いモーター開発を目指した新しい磁性材料及び基盤技術の開発を行っている。この中で、一般財団法人金属系材料研究開発センター (JRCM) は、第 1 期：技術調査センター、第 2 期：霞が関分室として関連する特許・技術動向調査を行ってきた。

本稿では、第 1 期に行った「磁石材料」¹⁾「軟磁性材料」²⁾「高効率モーター」の 3 分野についての特許・論文による技術動向調査研究のうち、「高効率モーター」についての技術動向分析結果の概要を紹介し、今後の展望について論じる。

2. 特許による高効率モーターの技術動向分析

高効率モーター特許は、国際特許分類 IPC を活用し、自動車駆動用および産業用モーターに絞り込み、S、A 級特許を、公開特許フロントページ或いは全文を査読にて選定し、技術・学術、産業、国家戦略、特許の 4 つの俯瞰軸からの判定基準をもとに分類した。技術・学術俯瞰における S 級特許には、高効率化、低損失駆動対応、高回転数対応、コンパクト化、軽量化等に関する先進性を有し、従来技術の延長ではない改良要素を備えたものを選定した。A 級特許は、少なくとも現状技術の改良要素を含んでいるとの観点から残し、それ以外を B 級とした。

図 1 に各国・地域の特許庁への公開日ベースの高効率モーター特許の全件数推移を示す (モーター制御技術は除く)。これまで日本において最も多くの件数が出願されてきたが、横ばいの傾向が見られる。中国特許庁への出願の件数が増えているのは、生産台数・販売台数とも世界一であることから、各国からの中国への出願が多いためと考えられる。欧州や米国、PCI(WO) への出願も、漸増する傾向が認められる。

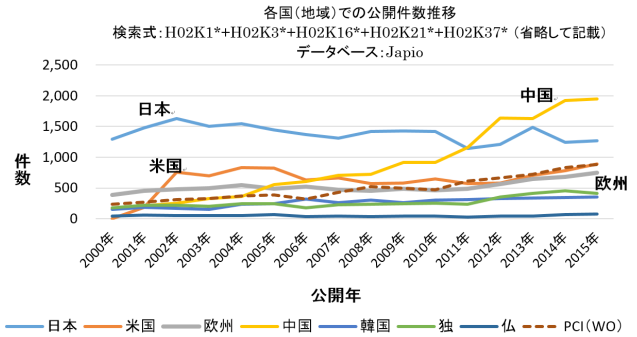


図 1 各国地域特許庁への高効率モーター特許の出願件数推移 (公開日ベース)

2.1 日本国内のモーター構造別特許出願動向

日本国内 S 級特許のモーター構造別の出願割合を図 2 に示す。埋込磁石型 (IPM: Interior Permanent Magnet) モーターが 52% と過半数を占めており、表面磁石型 (SPM: Surface Permanent Magnet) モーター、スイッチトリラクタンスモーター (SRM: Switched Reluctance Motor)、アキシアルギャップ (AG: Axial Gap) モーターがそれぞれ約 10% であった。なお SRM にはシンクロナスリラクタンスモーター (Synchronous Reluctance Motor) を含めている。

IPM は更に図 3 に例示するように、ロータに埋め込まれた磁石の配置により、ロータ表面近くに磁石が埋め込まれた IPM-A、磁石が V 字状に埋め込まれた IPM-B など、IPM-A から IPM-D に構造を分類した。何れにも属さない或いは 2 つ以上の分類に跨がるものを IPM-E とした。

図 4 に示すモーターの構造別公開件数推移を見ると、IPM-A は件数が多く継続的に出願されている。IPM-B や

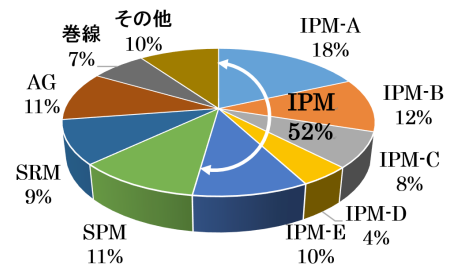


図 2 モーター構造別出願割合 (日本特許庁, S 級)

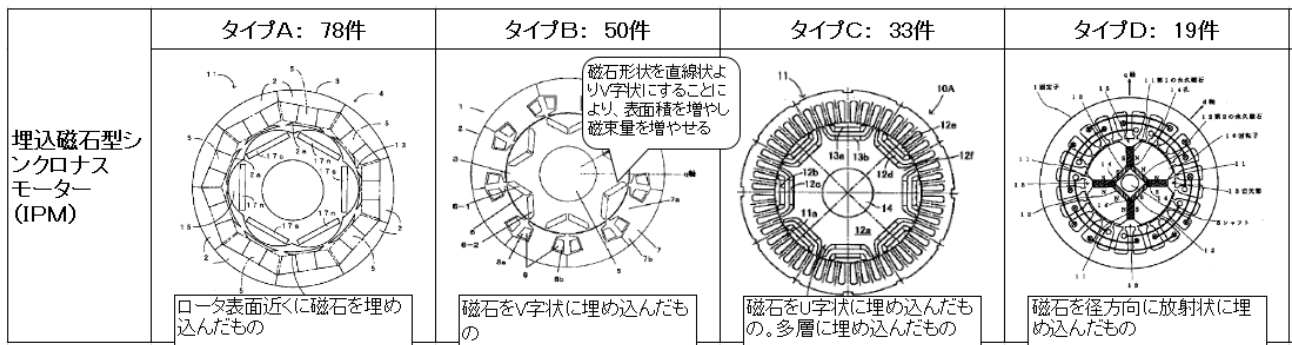


図 3 埋込磁石型モーター IPM のタイプの分類

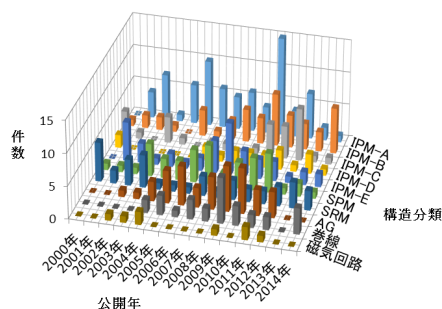


図4 モーターの構造別公開件数推移（日本特許庁）

IPM-Cは2007年頃以降、増加傾向が認められる。なお、何れの構造においても年により件数の凹凸はあるものの継続的に出願され、開発が進められていると考えられる。巻線に関する公開特許は、2009年と2014年にピークが見られる。

構造別の開発動向を見ると、IPM-Aでは、磁石をロータ表面から離し磁石内の渦電流損を少なくすると共に磁石外周側鉄心部でのリラクタンストルクを活用する方向と、リラクタンストルクを使わずにモーター特性を表面磁石型近づけ電流トルク特性の直線性を狙う方向が認められる。IPM-Bでは、磁石をV字形に配置することにより磁石の磁束量を増やすとともに、V字状配置の角度や間隔、磁束の流れをコントロールするフラックスバリア（磁石端部に設けられた空隙やスリット）形状などに詳細な検討が行われ、モータートルク（マグネットトルクとリラクタンストルクの和）を大きくし、高効率化を狙った技術が多く出願されている。また、磁極部先端のコアのみを別体とし、漏れ磁束低減や材料取り歩留まり向上を狙ったロータコア分割の例も見られる。IPM-Cでは、磁石を多層にしてトルク向上を図ったものと、固定磁力磁石と可変磁力磁石をロータに埋め込み、可変磁力磁石の磁力をモーター電流で変化させてモーターの特性を可変とする可変磁力モーターが多く出願されている。IPM-Dでは磁石の数を減らすなど、高出力を維持し低コスト化を図ったものが見られる。

以上IPMにおいては、IPM-BやIPM-Cが増えており、リラクタンストルクを活用する傾向が認められた。リラクタンストルクを活用することで、磁石量を減らし、ネオジム磁石の供給不安や価格高騰リスクを低減することも意図していると考えられる。

SPMでは、コギングトルクやトルクリップルを小さくする取り組みや、磁石取付構造に工夫し強度を向上させたものなどが見られた。SRMでは、磁石や励磁コイルの併用によりトルク向上を図ったものや、トルクリップル低減と騒音低減を図ったものなどが見られる。AGでは、2015年に販売されたアモルファスコアを用いた産業用モーターに関連した特許も見られた。飽和磁束密度はやや低いものの鉄損の小さいアモルファスコアとフェライト磁石を組み合せ高効率を達成するとともに、高出力とするため、モーターユニットを軸上に複数個設ける内容で出願されている。アモルファスは硬いことによる加工性の課題の克服など含め、今後の動向が注目される。

巻線では、ステータコアにコイルを巻装するのではなく、平角線でスパイラル状波巻に構成された巻線体の外側からコアを挿入する巻線技術が出願されている。従来の巻線に比べてコイルエンド部の巻線の無駄を省け、モーターの小型軽量化が可能で、HEV車に搭載されている。この技術を発展改良し、コアを分割しない形での検討が行われていると見られ、2013年以降に多数の出願が見られる。これとは別に、複数本のセグメントコイルをステータコアの端面から差し込み、逆側ステータコア端面から突出した

導体を折り曲げて接続し、ステータコイルを形成する出願が見られる。

冷却では、トランスアクスル内の潤滑油などの冷媒を、コイルエンド部やロータに流して冷却する内容の出願が見られた。ファン空冷に関するものや熱伝導を利用したものも見られたが、冷媒を利用するものが多数を占めたことから、冷媒を用いる冷却が車載駆動用モーターでの主流な方式と考えられる。

以上のように自動車駆動用モーターとしては高効率なIPMが主体で、誘導モーターIM(Induction Motor)が一部使われている状況にある。IPMはマグネットトルクの他にリラクタンストルクを活用でき、弱め界磁制御により低速から高速回転まで運転範囲を広げることができる。ただ、磁石を用いているために、高速回転時は磁石による損失（鉄損、渦電流損）が大きくなり、誘起電圧を抑えるために弱め界磁電流を流すことに伴う損失が発生する。磁石を用いないIMやSRMでは、IMは高速回転時にIPMの様な磁石による損失は発生しないが、励磁電流を流す必要があり、IPMより効率や力率が低くなる。SRMは構造が簡単で、高速回転時の耐遠心力性や効率が高く低コストが見込め、またDyフリーの観点からも開発が行われている。ただし、モーター構造上からトルクリップルが大きく、振動・騒音抑制の課題がある。

IPMの磁石は、磁気特性の優れたネオジム磁石が使われており、自動車駆動用として耐熱性を上げるためにDyやTbなどの重希土類を添加している。重希土類は産出地が限定されるために、供給不安や価格高騰の恐れがある。そのため省DyやDyフリーの磁石材料の開発が行われている。磁石全体に重希土類を分布させるのではなく、粒界に重希土類を拡散させ重希土類の使用量を減らす粒界拡散法が開発され、広く実用化されている。2016年には重希土類を使わない熱間加工ネオジム磁石と、その磁石を用いた自動車駆動用モーターの発表が行われた。熱間加工ネオジム磁石を用いたモーターでは、磁石への減磁界を減らすために、ロータ形状やフラックスバリア形状などの見直しが行われ、保磁力が従来より低い磁石も使えるよう工夫されている。駆動用モーター開発事例において、ロータなどの磁気回路最適化を行うことにより、リラクタンストルクの活用と使用磁石量を減らす取り組みが行われている。

モーターの高効率化に関連して新しく開発された技術で注目されるものとして、(1)スパイラル状波巻、セグメントコイル方式などの巻線技術、(2)アモルファスコアを用いた産業用モーター、(3)ナノ結晶合金を用いた試作モーター、(4)重希土類フリー熱間加工ネオジム磁石、などが挙げられる。IPMやIM、SRMなどの各構造のモーターにこれらの新しい技術を適用した場合、(1)は銅損の低減と小型化に、(2)、(3)は鉄損の低減に効果があると考えられる。IPMが駆動用モーターとして優位にある状況は暫く変わらないと考えられるが、IMは安価で構造が簡単、堅牢、AGは扁平形状にし易い、SRMは高速回転時の効率が良いなどの特長があり、それぞれの特長を生かした駆動用モーターとしての適用が考えられる。

2.2 欧州のモーター構造別特許出願動向

日本国内出願特許調査に加え、2015～2016年度に欧州特許調査を行った。特に欧州特許庁への出願特許に着目した理由として、車や工業化の歴史が古く基盤技術力が高い、BOSCH、SIEMENS、ABBなどの有力企業が多い、環境に対する意識が高くHEVやPHVに積極的に取り組んでいる、などが挙げられる。検索式は日本と同じとし、IPCを用いて2000年～2014年に公開された欧州特許庁EPOの特許を調べ、パテントファミリーで日本に出願されて

いるものを除いた3,177件を対象に調査を行った。図5に、欧州公開特許のS級およびA級の公開件数推移を示す。2000年より2006年までは件数は少ないが、2007年以降出願件数が増えており、S級は2011年以降増えている。ここではS級+A級201件を対象に分析を行った。

図6に欧州のモーター構造別の出願割合を示す。IPMの出願割合は、全体の30%程度で日本に比べると少ない。IPMの中ではIPM-Dタイプ（磁石を放射状に配置、スポークタイプ）が多く出願されている。日本では出願の少ない、横磁束型モーター（TFM：Transverse Flux Machine）や、SRMにおいて補助磁石や補助励磁コイルなどの補助励磁手段を有したフラックススイッチングモーター（FSM：Flux-Switching Machine）の出願が見られた。

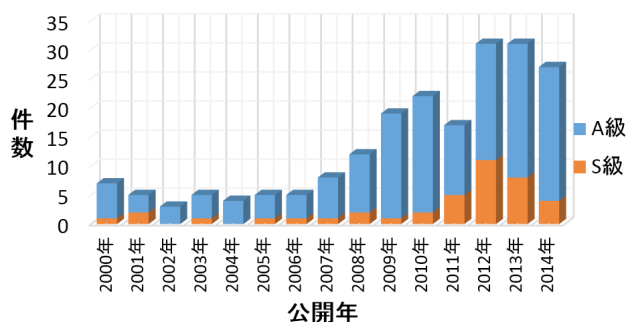


図5 欧州高効率モーター用特許の公開件数推移 (S、A級)

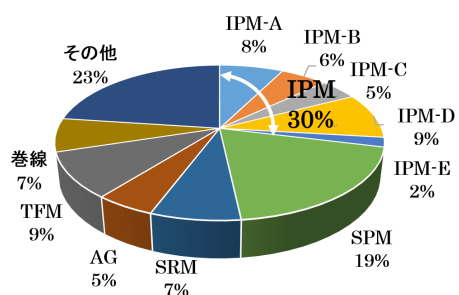


図6 欧州モーター特許の構造別出願割合 (S、A級)

SPMの出願内容は、表面磁石型にするために特別に工夫したものに加え、冷却構造や特殊構造モーターなど多岐に渡っている。SPMが広く使われるに従い出願数も増えている。IPM-Dは風力発電用などで検討され普及していると考えられる。磁石を放射状に配置することにより磁束量を多くできる特長があり、ネオジム磁石をフェライト磁石などに代えることにより、ネオジム磁石の供給不安や価格高騰リスクを避ける狙いもあると考えられる。TFMは磁路が複雑となるが、多極構成を容易に構成でき、低速大トルクの特長を得やすい。特許内容からある程度普及していると考えられ、自動車駆動用としては磁路構成など難しい面があるものの、今後の動きが注目される。SRMやFSMは、欧州ではIPMの代替技術として検討されており、研究並びに試作試行段階と考えられる。

3. 論文による高効率モーターの技術動向分析

2005～2012年の重要論文の主執筆者の国籍で見ると日本からの発表数が119件と突出して多く、日本以外の発表は韓国8件、中国4件、北米3件となっている(図7)。

日本以外の発表は磁場解析などのシミュレーションによる報告が多く、実機に関わる実験的検討結果は少ない。なお速報性の高い国際会議での報告や展示などでは、中国・韓国などからの報告件数も多く、欧州では高効率モーターの商業化について多くの産業対応が進められている。

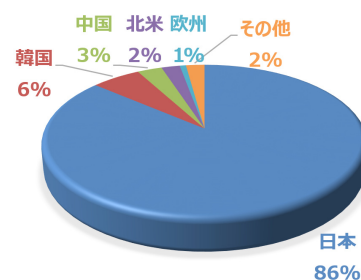


図7 高効率モーター重要論文の主執筆者の国・地域別割合

2005～2012年の範囲で論文の内容をみると損失に関するものが突出して多い。高効率をキーワードとするモーターは永久磁石埋め込み型IPMモーターが主力である。これは永久磁石の吸引力に加えてリラクタンストルクを併せ持つためと考えられる。近年見直されている高効率モーターとしてアモルファス薄帯のまま活用した新しいタイプのアキシシャルギャップ型モーターが2010年と2012年に発表され、注目される。

モーター損失の中ではヒステリシス損に関するものが61件と最も多い。これはモーターの高効率化のため高性能な鉄心材料（高級電磁鋼板）を用いた検討が増加したものである。次いで渦電流損に関するものが52件と続いている。渦電流損の増大を招く原因として磁束の飽和に起因する磁束波形の歪みによるものと、スロットリップを起因とする脈動損がある。渦電流損の小さい圧粉磁心材料を用いたものがあるが、ヒステリシス損が課題となっている。モーターの小型軽量化に向けて、高磁束密度領域を活用するための、磁束分布に関する論文30件も注目される。

モーターは材料と設計に加え、これらを生かした製造技術が伴って初めて所望の性能を得ることが可能となる。この課題はビルディングファクターとして知られているが、新しい視点からのモーター効率評価として取り組みまれている(24件)。工程軸に関する論文としては材料評価が最も多く、次いで電磁場解析・シミュレーション、モーター特性評価であった。

4. まとめ

希土類元素など、高性能磁石材料が安定的に供給される限りは、磁石材料、軟磁性材料の技術進歩と合わせ、今後もIPMを中心に高効率モーターの開発が進められるものと考えられる。省Dy、Dyフリー磁石材料技術の開発、高速回転時の損失を抑制するために鉄損が少なく飽和磁束密度が大きい軟磁性材料技術の開発、極数変換や可変磁力などの弱め界磁損失低減技術など、ハード・ソフト両面でこれら技術が一層進化し、世界で優位性のある実用高効率モーターとして、更なる発展が期待される。

[参考文献]

- 1) 豊田俊介、谷川茂穂:「高効率モーター用磁性材料の技術動向」、2019年電気学会産業応用部門大会、3-S4-1、Ⅲ-19～24
- 2) 豊田俊介、谷川茂穂、山内清隆:「モーター電磁材料のグローバル最新動向」、電気学会産業応用部門 家電・民生技術委員会 産業応用フォーラムテキスト 2020年2月25日@東京

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第406号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2020年8月1日
発行人 小紫正樹
発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11 東洋海事ビル6階
TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>
E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp