

TODAY

巻頭言



高効率モーター用
磁性材料技術研究組合
理事長 入山 恭彦
(インターメタリックス(株) 社長)

「高効率モーター用磁性材料技術研究組合 (MagHEM)」は、先月末で早設立 4 周年を迎えました。当組合は、9 企業 2 団体からなる組合員の協同による高効率モーター用磁性材料およびこれを用いたモーター設計に関する試験研究、その他組合員の技術水準の向上および実用化を図るための事業を行うことを目的として設立されました。設立直後に経済産業省の未来開拓プロジェクト「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」を受託し、2014 年度より委託元が NEDO 殿に移管され、NEDO 委託事業となりました。組合員でもある JRCM 殿には、当組合の事務・技術調査等で多大なご支援をいただいております。あらためてここに感謝申し上げます。

現在、世界の電気エネルギーの 55% をモーターが消費しています。今後、自動車の電動化等に伴い、モーター需要はますます拡大しますので、モーターの省エネ、すなわち高効率化は最重要課題の一つであります。図に示されますように、革新的な高性能磁石の開発と損失の少ない軟磁性材料の開発を行うと共に、これらの材料を用いて高効率のモーター設計の開発を行うことで、次世代自動車や家電、産業機械の心臓部であるモーターの省エネ化・競争力を確保し、我が国産業全体の活性化を目指しています。効果的な開発推進のため、組合員同士の共同活動だけでなく、文部科学省の元素戦略磁性材料研究拠点 (ESICMM) 等、他プロジェクトとの相互連携も進めてきました。

今年の 6 月 14 日に、これまでの MagHEM による研究開発実績に対する第二回目の中間評価分科会が開催され、間もなく評価結果が公表される予定ですが、各組合員の努力のお陰で概ねポジティブな評価をいただける見込みとお聞きしています。2015 年度末までの累積で、特許出願数は外国出願を含めて 69 件、査読付き論文が 58 件、研究発表・講演数が 206 件など、数字で見てもますますの実績を上げました。

8 月末にドイツのダルムシュタット工科大学で開催された The 24th International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and their Applications (REPM2016) に出席いたしました。この会議は、希土類磁石を始めとする永久磁石材料に関する世界最大級の国際会議ですが、出席者リストによれば日本からの参加者数は開催国ドイツの 130 名に次いで 71 名 (3 位は中国で 26 名、4 位は米国の 22 名)、発表件数で言えば日本は最

多の 50 件余り (2 位はドイツの 40 件余り) であり、日本の磁石研究の活発さが窺えました。発表内容から見ても、日本の発表は質が高いと思えました。すなわち、材料開発に関する発表は、高性能で実用的なものが多かったことに加え、微細組織観察・解析・シミュレーション等の基礎的研究も学術的に誇れる内容と感じました。言うまでもなく、これらの発表には MagHEM の成果も多く含まれておりました。国の主導もあり、日本の磁石研究者の層がかなり厚くなったと実感しました。

ただし、これらの成果を産業界に反映し、日本の競争力維持・強化につなげていくためには、今後のさらなる努力が必要と思われます。MagHEM の研究課題の中の Dy フリー NdFeB 磁石開発では性能向上が達成され、重希土類元素の調達リスクがない NdFeB 磁石として有望材料と判断されますが、実用化はこれからです。ラボスケールで発現した特性を工業スケールで安定的に得られるプロセスを低コストで確立する必要があります。また、新磁石材料の探索テーマにおいては、ThMn12 型結晶構造を有する新希土類系磁石材料や FeNi 系磁石材料で面白い結果が得られており、これらは今後 MagHEM の主要テーマとなる予定ですが、新希土類磁石については NdFeB 磁石と比較して工業的に優位性を持たせることが望まれます。FeNi 系材料については高い磁化を維持しつつ実用的な保磁力を発現させる技術開発が必要となってきます。いずれも、目標達成にはかなりの時間と努力を要することが予想され、これまで同様の産学連携・他プロジェクトとの連携が必須であり、予算面等での国の支援継続もお願いしたいところであります。

2050 年には 100% の自動車が駆動モーターを搭載しているという予測があります。モーターはそれに使用される磁性材料とともに大きく進化していくはずですが、MagHEM の一つの特徴として、組合員が材料メーカーとモーターメーカーから構成され、お互いが会話できる場所があります。モーターメーカーの方々とお話すると、単に磁石の磁力や保磁力を高めることだけでなく、磁石の形状や結晶配向方向等もモーター特性に影響することや、モーターコスト低減への材料への諸々の要求等がわかり、両者の対話と協力・連携が重要であることを再認識しました。モーターメーカー、材料メーカーともに各社の独自技術・ノウハウがあり、連携と言っても難しい点は多いでしょうが、国には企業間の連携が重要なテーマや企業単独では実施が難しいテーマ (例えば、リサイクルシステムの検討等) を今後も主導していただければ強く希望いたします。

MagHEM の成果を産業界への貢献へつなげるために今後も努力していく所存です。最後になりましたが、JRCM 殿には MagHEM 活動への相変わらずのご支援をよろしくお願い申し上げます。

電気機械としてのモータ開発研究の紹介

名古屋工業大学 電気・機械工学専攻 教授 小坂 卓

1. 電気機械としてのモータ

平成 28 年 4 月より名古屋工業大学では新学科・新専攻がスタートし、従前の電気電子工学科と機械工学科が融合して電気・機械工学科／専攻となって新たな教育研究を進めている⁽¹⁾。電気工学と機械工学はそれぞれの学問体系を有するが、一方で世の中で実用されているシステムの多くは、電気と機械は切っても切れない関係となっている。例えばハイブリッド自動車では、燃費向上や走行性能向上を目的に、エンジン、ギヤ、インバータ駆動モータが結合し、協調動作している。さらにモータだけを取ってみても、それは電気機械 (Electric Machines) の一種であり、電気工学の範疇である電氣的・磁氣的な設計はもとより、作り易さ、高速回転時のロータ機械強度、振動や騒音など、その設計には機械工学に基づく知識が必要不可欠である。こうした現状を踏まえて、名古屋工業大学電気・機械工学科／専攻では、電気と機械が融合したシステムを扱う技術者の育成という新たな教育研究の実践に取り組んでいる。

電気・機械工学科／専攻に所属する本研究室では、電気機械としてのモータを中心に研究開発を進めており、その一例を以下紹介する。

2. 可変界磁モータの研究開発

周知のように自動車産業では、モータによる電気駆動を主あるいは補助的に採用した電気自動車 (EV) やハイブリッド自動車 (HEV) など低環境負荷対応車の市場投入、研究開発が世界的に進められている。現在、その走行用モータには、小型軽量・高効率の観点から希土類系磁石を用いた永久磁石形同期モータ (以下 PMSM と略記) が主に採用されている。PMSM において、(i) 市街地走行に相当する低中速回転域での高トルク密度化 (小型化) や銅損低減による高効率化の実現には、ステータロータ間のギャップ面での界磁磁束密度を出来る限り高く設計することが望ましい。一方、(ii) 高速道走行に相当する高速回転域でのインバータ故障を想定した逆起

電力抑制 (素子耐圧) や鉄損低減、弱め磁束電流による銅損を抑えた高効率化の実現には、界磁磁束密度を低くする必要がある。ほぼ固定磁束源とみなせる界磁磁束源としての永久磁石を有し、かつ多様な動作点を実現しなければならない走行用 PMSM において、上記 (i)(ii) は小型・高効率化両立設計の背反問題を意味する。

これに対し、走行用モータを対象に界磁磁束そのものを変化させることで小型・高効率化を目指した種々の可変界磁モータが近年、注目を集めている⁽²⁾。本研究室でも、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) の委託事業である未来開拓研究プログラム「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」の下、永久磁石界磁と巻線界磁を併用した可変界磁モータの 1 種であるハイブリッド界磁モータフラックススイッチングモータ (以下、HEFSM と略記) の研究開発を進めている⁽³⁾⁽⁴⁾。

HEFSM の構造断面図とその試作機試作過程におけるステータの写真を図 1 に示す。同図の HEFSM は 20 極 12 スロットタイプで、積層電磁鋼板で構

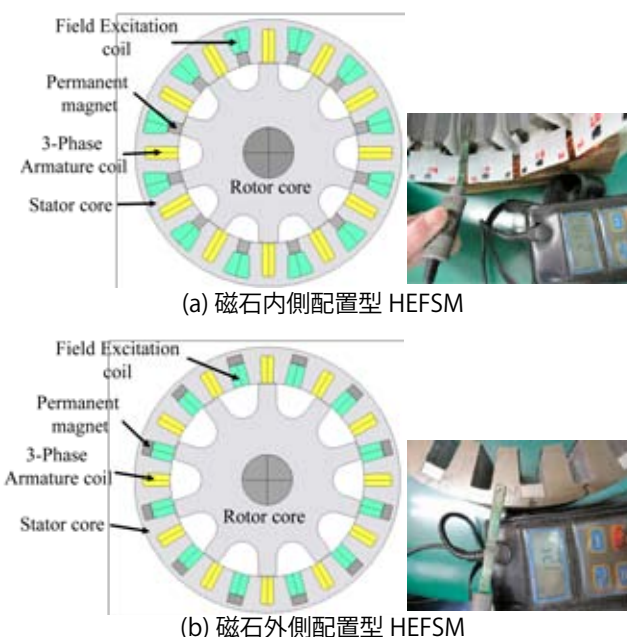


図 1 HEFSM の構造とステータ試作過程写真

成されるステータコアに電機子巻線スロット (図中黄色) を 12 スロット有し、その中間に永久磁石ならびに界磁巻線を収納する 12 の界磁巻線スロットを有する。ロータは積層電磁鋼板のみで構成される突極構造である。この構造から HEFSM は以下の特徴を有する。

- ①巻線・磁石など発熱部が固定子側に集約され冷却容易
- ②スイッチトリラクタンスモータ (SR モータ) と同様に回転子が積層電磁鋼板のみで構成され、堅牢性に優れ、高速回転に好適
- ③ 2 次元磁気回路で構成され、圧粉鉄心などの特殊な部材が不要で、製造容易かつ安価

一方、同図 (a)(b) に示すように、界磁巻線スロットにおける永久磁石の配置によって、HEFSM は 2 つのタイプに分類される。同図 (a) は界磁巻線スロットのステータ内周側に磁石を配置した磁石内側配置型、同図 (b) はステータ外周側に磁石を配置した磁石内側配置型である。

低速回転域での高トルク化と銅損低減、高速回転域でのモータ逆起電力抑制と鉄損低減、これら 2 つの PMSM の設計背反問題に対し、HEFSM では界磁巻線電流の調整による可変界磁動作によりその克服が期待できる。一例として、磁石内側配置型 HEFSM の界磁巻線非通電時の永久磁石磁束の流れを図 2 に示す。同図 (a) 内の青破線で示す磁束はエアギャップ面を通過する永久磁石磁束であり、界磁巻線非通電時のマグネットトルク発生に寄与する界磁磁束となる。一方、同図 (a) 内青実線で示す界磁巻線非通電時の永久磁石磁束は、図示のようにその大部分が N 極端面を出発点に界磁バックヨークを通過して S 極に戻るステータ内短絡経路を辿る。界磁巻線を非通電とすればギャップ磁束密度を低くでき、その結果、高速回転域でのモータ逆起電力抑制や鉄損低減が可能となる。次に、界磁巻線通電による強め界磁制御

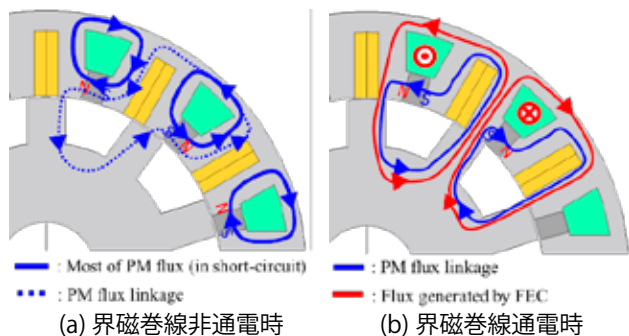


図 2 HEFSM の可変界磁動作原理

時のモータ内部の磁束の流れを同図 (b) に示す。界磁巻線起磁力から見た永久磁石の磁気抵抗は大きいいため、界磁巻線起磁力によって生じる磁束は赤線で示す磁束経路を辿る。永久磁石磁束は界磁巻線起磁力により界磁バックヨーク部への短絡経路を遮断され、青線で示すように全磁束がギャップ面を通過する。この結果、界磁巻線起磁力によって生じる磁束と永久磁石磁束がギャップ面で合成されて強め界磁動作を実現でき、電機子巻線磁束鎖交数の増加、すなわちトルク定数の増加による高トルク出力や電機子巻線の銅損低減が可能となる。なお、詳細は割愛するが、磁石内側配置型 HEFSM でも同じ動作原理で界磁磁束を可変させることが可能である。

本研究室でのそれぞれの設計・試作試験検討結果から、同一外形サイズの下、両者は、最大トルク、最大出力、効率、耐減磁設計に要する磁石固有保磁力の点で、トレードオフの関係性を有することを明らかにしている。これらを踏まえ、磁石を界磁巻線スロットの径方向中央に配置した磁石中央配置型 HEFSM を新たに提案し、設計・試作試験結果より、その有用性を検証している⁽⁴⁾。

磁石中央配置型 HEFSM の構造断面図ならびにその試作機試作過程におけるステータの写真を図 3 に、ステータ完成部品とロータ完成部品の写真を図 4 に示す。本試作機を含む全ての試作機は、比較基準とした 2009 年発売のトヨタ自動車社製第 3 世代プリウスの駆動用埋込磁石形同期モータと同一モータ外形サイズ、同一電気的・熱的制約条件の下で、設計している。

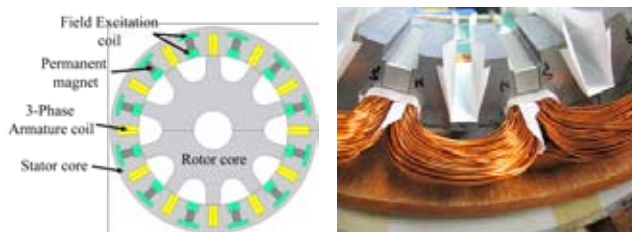
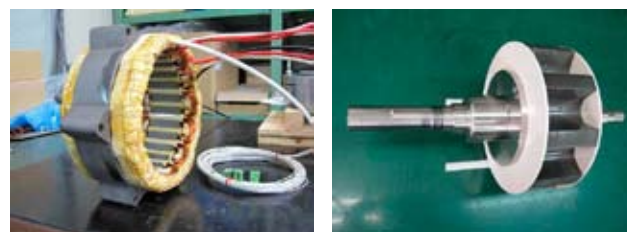


図 3 磁石中央配置型 HEFSM



(a) ステータ完成部品 (b) ロータ完成部品

図 4 磁石中央配置型 HEFSM の試作機写真

磁石中央配置型 HEFSM の試作機で計測した速度-最大トルク & 最大出力特性を図5に示す。2,000r/min以下の低速回転域で目標最大トルク 207Nm を実現し、4,000r/min以上の中高速域で目標最大出力 60kW を実現している。永久磁石には信越化学製の低保磁力の粒界拡散磁石 N46UH-G を使用しており、180℃仕様条件下で不可逆減磁を生じないように設計している。モータ効率については、市街地巡航走行ならびに高速道巡航走行条件下では、比較基準モータにかなり近い効率特性を示していることを確認している。詳細は、文献(3)(4)を参照されたい。

図4(b)に示したロータの軸両端部に白色の円状板が設けられていることに着目されたい。ロータの電磁的な構造としては、図3に示す積層電磁鋼板のみで構成される突極構造であるが、最高回転数 13,500r/min の対象自動車駆動用途では、突極構造に起因した風損が大きく、高速回転域での効率を大幅に悪化させる。一例として、10,000r/min時に突極構造ロータによって生じる空気の流速解析結果を図6に示す。同図より突極間部からロータ軸両端部空間への空気の流れがあり、軸端部空間で高い流速を生じている。この結果から、突極間部から軸両端部空間への空気の流れを遮断することで、風損の大幅な低減が予測される。前述の白色の円状板はこの空気の流れを遮断するシュラウドで、電磁的な特性に影響を与えず、最高速回転時の機械強度の観点から、PPS (Poly Phenylene Sulfide Resin)製の円状板を採用している。シュラウドの有無で10,000r/min時の機械損を、594Wから196Wへと67%の大幅な低減効果が得られることを実験で確認している⁽⁵⁾。

3. おわりに

電気・機械工学科/専攻に所属する本研究室の取り組みとして、近年注目を集める新たなタイプの変換磁モータを一例に、電気機械としてのモータの研究開発について紹介した。ロータ構造設計による風損低減は、電気機械としてのモータの設計開発

例であり、この他にも振動や騒音の抑制などモータ単体での設計はもとより、より大規模な電気機械システムを対象とした電気工学と機械工学の両面に基づく両立設計は今後ますます重要になると考えられる。本学での電気・機械工学科/専攻での教育研究の取り組みを通じて、電気と機械が融合したシステムを扱う優れた技術者の育成を目指したい。

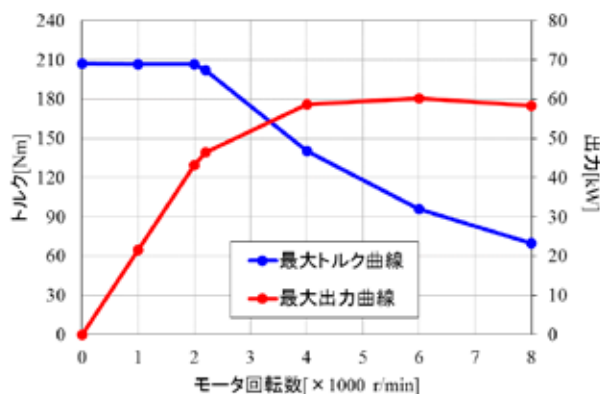


図5 磁石中央配置型 HEFSM の速度-最大トルク & 最大出力特性 (実験結果)

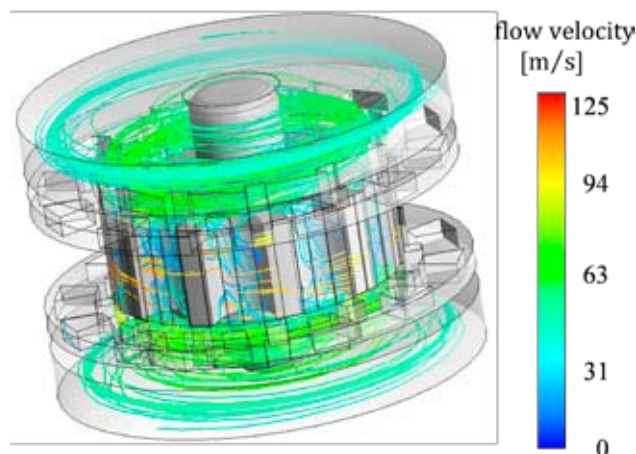


図6 突極構造ロータの流速解析結果 (10,000r/min)

参考文献

- [1] 名古屋工業大学電気・機械工学科/専攻 HP, <http://elemech.web.nitech.ac.jp/>
- [2] 小坂卓:「走行用モータの小型高効率化を狙う可変界磁技術」, 平成28年電気学会全国大会講演論文集, No. 4-521-7, Vol.4, pp.22-23 (2016)
- [3] 小坂卓:「高出力密度・高効率可変界磁モータ技術」, 平成28年電気学会産業応用部門大会講演論文集, No. 3-58-6, pp. III -53- III -58 (2016)
- [4] Y. Maeda, T. Kosaka and N. Matsui, "Design Study on Hybrid Excitation Flux Switching Motor with Permanent Magnet Placed at Middle of Field Coil Slot for HEV Drives", Proc. of the 2016 International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 2524-2530(2016)
- [5] H. Nakane, Y. Okada, T. Kosaka and N. Matsui, "Experimental Study on Windage Loss Reduction using Two Types of Rotor for Hybrid Excitation Flux Switching Motor", Proc. of the 2016 International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp.1709-1715 (2016)

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第360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製・複製・転載することを禁じます。

発行 2016年10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