

TODAY

## バルク磁性材料をつくる

国立研究開発法人産業技術総合研究所  
磁性粉末冶金研究センター長  
尾崎 公洋

永久磁石や軟磁性材料などの磁性材料は、古くから機能性材料として重要な材料であることは、みなさんご存知だと思います。日本で材料の発見や開発が進められてきたこともあり、国内の多くの企業で製造され、世界の中で強いイニシアティブと高いシェアを持っています。このことから、磁性材料は産業として成熟しているような感じがあり、最近では公的な研究機関では、磁性材料の開発はほとんど行われていません。そのためか、我々が地道に磁性材料の開発を進めていると、企業様からの問い合わせが非常に多く寄せられるようになりました。

そこで、国立研究開発法人産業技術総合研究所は、今年4月に、バルクの磁性材料を集中的に研究・開発する、磁性粉末冶金研究センターを設立いたしました。「冶金」という名称は今ではほとんど耳にしなくなったと思いますが、ここには「材料をつくる」という私たちの強い意思を表しています。材料づくり特に金属系の材料づくりには冶金学が脈々と生きています。

当研究センターでは、磁性材料の中でもバルク材料を中心に開発をいたします。まずは、永久磁石、磁気熱量材料、軟磁性材料をターゲットとして、これを支えるプロセス技術を含めて開発を進めます。

永久磁石はすでにネオジウム磁石という非常に優れた磁石があり、これを凌駕するような材料は事実上まだ出てきていません。当研究センターではサマリウム-鉄-窒素系の耐熱性磁石材料の開発を行っています。この磁石はネオジウム磁石より高温特性は優れているのですが、焼結できないという欠点がありました。当研究センターでは、磁石粉末の作製から見直し、個々の問題点を丁寧に調べ上げ、プロセスを一から構築し直すことで、この欠点を克服することができました。この研究を進めていく中で、従来のネオジウム磁石の作製方法では問題にならなかった点が顕著に現れてきています。実用化には課題がまだ残っておりますが、引き続き研究開発を進め、実用化さらには製品化を目指します。

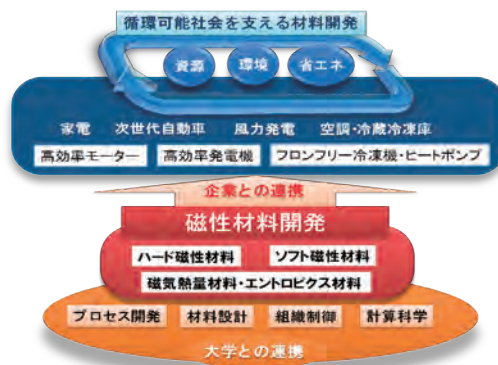
磁気熱量材料は、主に磁気冷凍システムに使用します。磁場の印加・除去によって材料が発熱・吸熱をするため、システムを作り込むことによって冷凍機として作動させることができます。地球温暖化ガスを使用しないため、地球環境にやさしい冷凍・冷蔵システム

として、特に海外での動きが活発化してきており、国内でも取り組む必要があると考えています。当研究センターでは、鉄-ランタン-シリコン-水素系の磁気熱量材料を開発しており、その特性向上と安定的に作製するためのプロセス開発を進めています。さらに、冷凍システムについても基盤となる技術の開発を進めています。

軟磁性材料は、現在、モーターコア材に使えるような特性を持つ材料の開発を進めています。ご承知の通りモーターコア材料としては、現在、電磁鋼板が主流であり、性能と量産性、コストのバランスが取れている点ではこれ以上ない材料になっています。しかし、より高い性能を期待している声も聴かれます。磁気特性とコスト（生産性含めて）の両面で検討する必要があります。また、軟磁性材料は、様々な用途に使用されており、広い産業用途がありますので、ニーズに応じて材料開発を行うことを考えています。

永久磁石や軟磁性材料は古くから研究されており、すでに優れた材料が市場を形成しています。これらに向かうためには相当の覚悟で臨む必要があります。一方、磁気冷凍材料並びに磁気冷凍システムは、システムそのものの市場が形成されていない状態ですので、本当に使えるものにするための様々な課題をクリアする必要があります。いずれも、材料開発は一朝一夕にできるものではなく続けていくことが重要ですので、粘り強く進めていきます。

産総研は技術を社会に出すことを最終目的としています。開発した材料を早期に実用化するためには、民間企業の協力が欠かせません。そのためには、企業に興味を持っていただき、投資をしても作りたいと思っただけの、特徴のある材料や生産性のあるプロセスの開発が必要であると強く考えています。当研究センターでは、この考えを常に頭において、研究開発を進めていく所存です。



## 電気自動車社会における磁性材料研究と電磁システム研究の紹介

### 豊田工業大学 教授 藤崎 敬介

#### 1. モータ駆動システムの今日的意義

ハイブリッドカーをはじめとしたモータ駆動システムを用いた電気自動車は、それを併用することで高効率化を実現した。現在では更に、船、機関車、航空機、工場内搬送など人・ものの移動といったあらゆる分野に応用展開されつつある。これは、これまでの内燃機関の駆動から、電気モータ駆動といった移動革命が実質進行している状況といえる。電気モータは、ステータロータ間に発生する磁束密度から Maxwell 応力により電磁トルクを出力するものなので、大きな磁束密度が得られる NdFeB や電磁鋼板といった磁性材料が使用されている<sup>1,2)</sup>。

電気モータ自体は、100 年以上前より実用・普及して、第二次産業革命のキーテクの一つであった。そこでは上下水道や空送などのファン・ブローといった地上置きのものであり、電力系統電源に直接接続して駆動されていた。電力系統は 50/60 Hz といった一定周波数・一定電圧であるので、このモータシステムでは移動のための高効率駆動を実現するには一般的には難しかった。

これに対して、移動に使用されるモータでは、速度・電磁トルクが時々刻々に変化する可変速駆動であるために、モータに供給される電圧・周波数もそれに合わせて時々刻々変化する必要がある。従来の電力系統に直接接続する方式では、それを高効率に実現させることは難しかったが、電力用半導体をスイッチング動作として用いるパワーエレクトロニクス技術は、可変周波数可変電圧を高効率かつ高応答に実現できるようになった。

つまり、モータ駆動システムの移動革命は、NdFeB といった磁性材料の発展と合わせて、パワーエレクトロニクス技術は必要不可欠といえる。半導体のムーアの法則のごとく、パワーエレクトロニクス技術においても、小型・高効率・低コスト化が進展し、今後電気エネルギーのほとんどがパワーエレクトロニクス電源を介して利用される、とも言われている<sup>3)</sup>。内燃機関から電気モータへの移動革命は、パワーエレクトロニクス励磁を前提に進展するものといえる。

#### 2. パワーエレクトロニクス励磁による磁性材料への期待

移動体に使用される電気モータはパワーエレクトロニクスにて励磁されるので、図 1のごとくそこで使用されている磁性材料もパワーエレクトロニクス器の一種であるインバータなどで励磁される。電気モータの損失としては、大きく分けて銅損、機械損および鉄損に分類される。銅損は超電導、機械損は磁気ベアリングと低圧駆動などといった技術で損失を極限まで低減させることはできるが、鉄損については材料レベルでゼロにできるものはなかった。今後多用化が期待される電気モータの高効率化を考えると、鉄損の現象解明及び低減策の研究は僅々の課題といえる。しかもそれはパワーエレクトロニクス励磁が前提となる。

しかし、モータのコアとして使用される磁性材料と、その電源であるインバータにて使用される電力用半導体とを、関係つけて考えることはほとんどなかった。それは、図 2のごとく磁性材料と電力用半導体との間には、モータおよびインバータ回路などが介在しており、また図 2における技術要素は、物理、材料、電気、機械と種々の分野にまたがっていて相互の技術交流が十分ではなかったことが要因と考えられる。これらを利用する電気自動車の高効率化を考えるなら、それらを統一的に融合する研究開発が必要である<sup>4)</sup>。

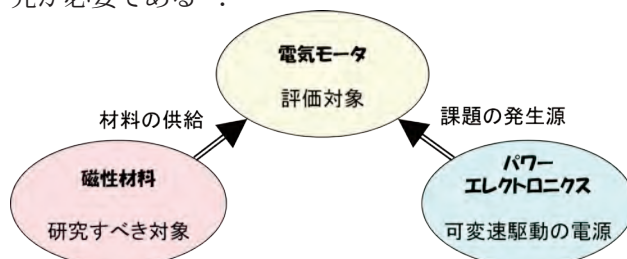


図 1. 電気モータのための  
パワーエレクトロニクス励磁下の磁性材料



図 2. 磁性材料と電力用半導体の  
材料プロセスから応用までの技術要素とその相互関係

インバータでは、基本周波数が高周波化になるだけでなく、キャリア周波数およびスイッチング動作による立ち上がり・立下り周波数といった種々の高調波に起因する新たな周波数成分が出現する。従来の電力系統使用を前提とした低周波の単一周波数のみの磁性材料では十分に対応できないことになる。

更に、電力用半導体としては、高電界耐圧、高エネルギーギャップ、高移動度の GaN や SiC といった新材料の研究開発が推進されている。その結果従来の Si 系の材料と比べて、高周波、高電圧、高温な動作が可能となる。こうした動作条件は、機器の小型・高効率化に大きく貢献し、その小型高効率化は、駆動源が機上置きとなる移動体においては特に重要なことである。今後の電気自動車応用などを考えると図3のごとく、kHz から MHz までの高周波領域、更には電力にては kW から MW といった領域が今後の大きく進展する動作領域といえる。このため、電気エネルギーに関係する技術は全てこの動作領域を前提とした研究開発が期待されるが、とりわけ磁性材料への期待は多大なものがある。それは、図3の動作領域に適した磁性材料が特に少ないからである。一例を図4に示すが、あるパワーエレクトロニクス器における磁性材料のコスト割合が大きくなっていることがわかる<sup>5)</sup>。

こうした新しい技術領域の研究開発のためには、従来にない領域なので新たな学問に基づく研究を必要とする。電磁界マルチスケールといった電磁界解析技術および高周波大出力の磁気計測技術、高周波域での非線形・異方性・ヒステリシス現象の電磁気学、漏洩電磁場、などがそれに該当するものといえる。

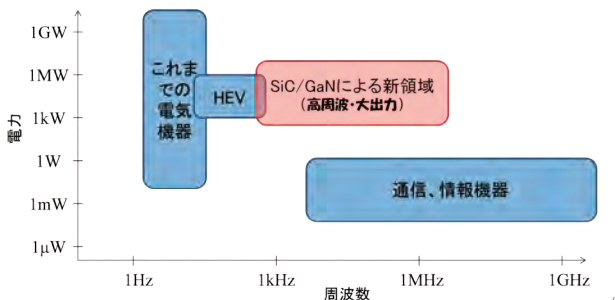


図3. 今後電気エネルギーで必要とされる周波数・電力の動作領域

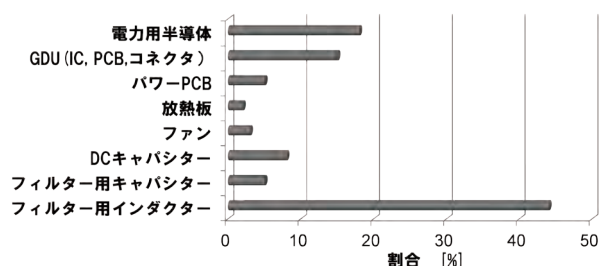


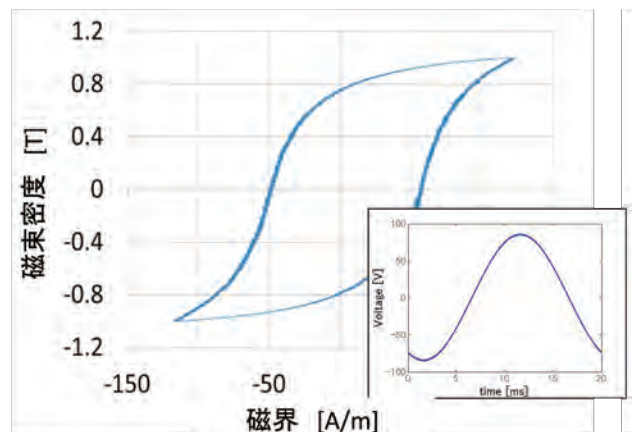
図4. パワーエレクトロニクス機器(20kVA-UPS)のコスト構造<sup>5)</sup>

### 3. 電磁システム研究室での取り組み

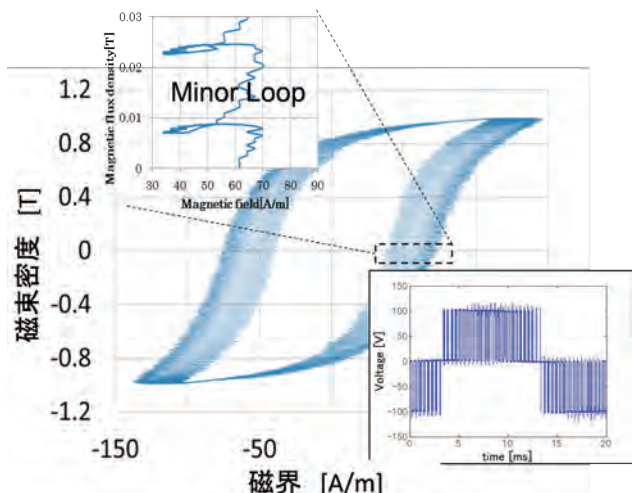
このような時代背景のもと、当研究室では電磁界融合学を目指して研究に取り組んでいる。ここでは紙面の都合上、①インバータ励磁による磁気特性、および②磁性材料特性を活かしたモータコアの試作、について紹介する。

#### ①インバータ励磁による磁気特性

電磁鋼板といった磁性材料は、JIS および IEC の規格により<sup>6)</sup>、その材料評価は時間高調波成分を含まないリニアアンプでの励磁にて磁気計測することになっている。しかしながら、前述のごとく電気モータでは時間高調波を含んだインバータで励磁される。そこで、両者の磁気特性の違いを明らかにすべく、外径 127 mm、内径 102 mm、厚み 7 mm のリング試料にて材料評価を行った。結果を図5に示す<sup>7)</sup>。



(a) 正弦波励磁 (鉄損:1.22W/kg)



(b) インバータ励磁 (鉄損:1.65W/kg)

図5. 正弦波励磁とインバータ励磁における磁気ヒステリシス特性<sup>7)</sup>

正弦波励磁では時間高調波を含まないために、きれいな磁気ヒステリシス曲線を描いているが、インバータ励磁では時間高調波のために、キャリア波に応じたマイナーループが生成している。マイナーループはインバータ内の電力用半導体のオン電圧

と、印加電流と電圧の関係により、クローズドループになったりオープンループになったりする<sup>8)</sup>。鉄損値を比較すると、インバータ励磁のほうが大きく、インバータの励磁条件、半導体特性、試料の形状により、2割から数倍と大きくなっている。GaN インバータにてキャリア周波数を190 kHzまで上げると、鉄損値は小さくなるがデッドタイムの影響で鉄損は上昇し始める<sup>9)</sup>。

インバータ励磁による鉄損増加は、IPM-SM といったモータにても確認されている<sup>10)</sup>。材料特性同様、IPM-SM でもインバータのキャリア周波数、変調率、直流電圧、デッドタイム、電力用半導体特性といった励磁条件やモータコア形状がモータコア損に大きく影響している。このため、低損失なモータ駆動システムの実現のためにはインバータ励磁と鉄損との関係を、今後更に研究することが期待される。

## ②磁性材料特性を活かしたモータコアの試作

殆どのモータの鉄心には軟磁性材料の無方向性の電磁鋼板が使用されているが、鉄損の小さい軟磁性材料としては、方向性電磁鋼板、アモルファスなどが存在する。それぞれ大きな磁気異方性や、加工性および小さな飽和磁化、並びに製造方法など課題があり、汎用のモータへの適用は考えにくい、航空機や宇宙といった特殊用途への展開は期待できる。

図6は、アモルファスステータコアの引摺り損のコア損失特性である<sup>11)</sup>。コア形状が同一なNO材モータとも比較しているが、コア損で半分以下に低減している。コア損には、ステータ損だけでなく、ロータ損および永久磁石損も含まれている。

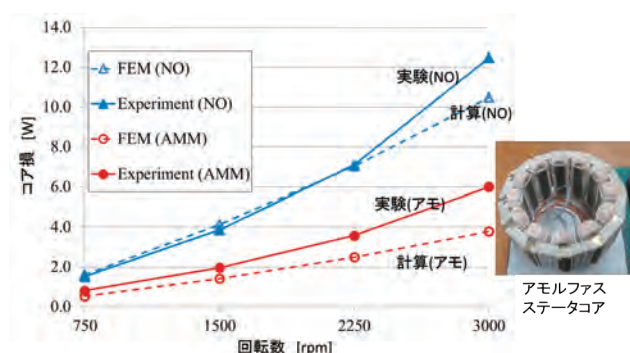


図6. アモルファスモータによる鉄損の低減<sup>11)</sup>  
(引き摺り損、ロータはNO、永久磁石での損失含む、IPM-SM)

## 4. 今後の高効率モータ研究のあり方

内燃機関から電気モータ駆動といった移動革命が進行している現在、モータ駆動システムの高効率化の研究開発、特に磁性材料の研究開発は僅々の課題といえる。そのためには、パワーエレクトロニクス励磁を前提となっている現在ではその材料開発も、材料の評価手法が従来とは大きく異なる。モータは最終的には、例えば電気自動車などで評価されるべきなので、やはりここでもそこでの評価が望まれる。モータの形状としてもラジアル型、アキシアル型、また電気自動車におけるモータ駆動システムとしては、高回転小型化またはダイレクトドライブ軽量化、などいくつか考えられ<sup>12)</sup>、それぞれ必要とする磁性材料の基本仕様は異なってくる。そこで、モータや電磁自動車の仕様を種々に変えて試作し、磁性材料に要求される仕様および技術課題を論じることが、今後必要となるものとする。

### <参考文献>

- 藤崎敬介「基調報告「次世代モータと磁性材料の課題」」公益社団法人日本磁気学会、第3回岩崎コンファレンス「磁気理工学のエネルギー分野への革新的展開」平成26年12月3日~4日、高輪和強館。
- 本蔵、藤崎「最新の磁性材料の開発」電気学会雑誌、Vol. 134, No.12, pp.828-831, 2014.
- T. Heidel: "ARPA-E Initiatives in High Efficiency Power Conversion", APEC (Applied Power Electronics Conference and Exposition) 2014, Plenary Session Presentations, Fort Worth, (2014).
- K. Fujisaki, "Required Magnetic Property for Energy Magnetic Material," Oct.29 - 31, 2014, 3rd International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS), A1 - 03, 2014.10.
- J. W. Kolar, F. Krismer, H. P. Nee, "What are the 'Big CHALLENGES' in Power Electronics?", Presentation for the 8th International Conference of Integrated Power Electronics Systems (CIPS 2014), Nuremberg, Germany, February 25-27, 2014.  
[https://www.pes.ee.ethz.ch/uploads/tx\\_ethpublications/CIPS\\_2014\\_Kolar\\_Challenges\\_Power\\_Electronics\\_Video.pdf](https://www.pes.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/CIPS_2014_Kolar_Challenges_Power_Electronics_Video.pdf) (H28.8.20)
- Japanese Industrial Standard, C2556, 1996. International Electrotechnical Commission, 60404-3, Second edition, 1992.
- 藤崎敬介、山田諒、日下部隆弘「PWMインバータとリニアアンプの励磁電源による鉄損・磁気特性の差異」電気学会D論文誌、Vol. 133, No. 1, pp. 69-76, 2013.
- K. Fujisaki, S. Liu "Magnetic Hysteresis Curve Influenced by Power-Semiconductor Characteristics in PWM Inverter," Journal of Applied Physics, Vol. 115, 17A321, 2014.
- 田中陽大、古賀尚子、小木諒介、小田原峻也、藤崎敬介「GaN FET 単相PWMインバータによる高キャリア周波数励磁時の鉄損特性」電気学会D論文誌、Vol. 136, No. 2, pp.110-117, 2016.2.
- N. Denis, S. Odawara, K. Fujisaki, "Attempt to Evaluate the Building Factor of a Stator Core in Inverter-fed Permanent Magnet Synchronous Motor," IEEE Tran. Ind. Elect., (in printing)
- S. Okamoto, N. Denis, M. Ieki, K. Fujisaki, "Core Loss Reduction of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using Amorphous Stator Core," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 52, No. 3, pp. 2261-2268, May/June 2016.
- K. Fujisaki, "Future Trend of Electrical Motor Drive System," 第39回日本磁気学会学術講演会シンポジウム, "Energy Magnetics improving motor efficiency", 09aA-3, 講演概要集 2015, pp.91-92, H27.9.9

The Japan Research and Development Center for Metals  
JRCM NEWS / 第359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9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](mailto:jrcm@oak.ocn.ne.jp)