

# 電磁アクチュエータシステムのための 磁性材料とその評価技術

電磁アクチュエータシステムのための磁性材料とその評価技術調査  
専門委員会編

## 目 次

1. はじめに		4. 電気工学における磁性材料	
「次世代高効率モータの最近の進展」		4.1 モータ鉄心としての電磁鋼板	42
1.1 高効率モータおよびパワーエレクトロニクスのための磁性材料研究開発	03	4.2 圧粉磁芯用粉末のヒステリシス損に及ぼす原料鉄粉特性の影響	45
1.2 高効率モータ用の最近の軟磁性材料の動向	04	4.3 焼結NdFeB永久磁石	51
1.3 自動車における磁気センサの技術動向	08	4.4 NdFeB系異方性ボンド磁石	52
1.4 「永久磁石の製造プロセス、評価方法、高効率採用」～さらなる次世代高効率モータ設計開発のために～	12	5. 磁性体マルチスケール解析	
1.5 高周波向け磁性材料について	18	5.1 電気自動車用磁性材料の磁区構造計算の問題	55
1.6 マイクロマグネティクスを用いた電磁鋼板の磁区構造解析	23	5.2 積層鉄芯と圧粉鉄芯の均質化法	58
2. パワーエレクトロニクスで励磁される磁気・磁性材料の研究の必要性		6. 磁性材料と磁気特性計測	
2.1 磁気研究への期待	27	6.1 軟磁性材料の応力印加時の磁気計測手法	60
2.2 アモルファスおよびナノ結晶軟磁性合金のモータ用鉄心への応用の現状と動向	27	6.2 高保磁力磁石の磁気測定装置と課題	64
2.3 駆動用モータの高効率と小型化のための磁性材と磁気計測	33	6.3 磁気ナノ粒子の磁気特性測定およびその応用	67
3. パワーエレクトロニクス励磁の磁性材料の必要性		7. 磁性材料の磁気特性を活かした磁気応用	
3.1 スイッチング電源における磁気部品への期待	34	7.1 高効率モーター用磁性材料の技術動向	69
3.2 SiC/GaNパワーエレクトロニクスと高周波電力磁気応用のコラボレーション	37	7.2 鉄系アモルファス薄帯の磁気特性制御とバーニアモータへの応用	75
		7.3 アモルファス合金薄帯の小型ラジアルギャップモータへの適用評価	81
		7.4 磁歪材料と磁気双安定素子	85
		7.5 電解めっき法を利用して作製した軟磁性薄帯	89
		8. パワーエレクトロニクス高周波電磁場の物質照射	
		8.1 パワーエレクトロニクス高周波電磁場の物質照射技術	91
		9. モータ・パワーエレクトロニクス応用時の要請	
		9.1 従来の間違いを正した新磁性理論に基づく超強度永久磁石の設計開発	95
		9.2 ベクトル磁気ヒステリシス特性とその応用	95
		9.3 駆動時のモータの磁気計測	97

# 電磁アクチュエータシステムのための磁性材料と その評価技術調査専門委員会委員

委員長 藤崎 敬介(豊田工業大学)  
幹事 進藤 裕司(川崎重工業)  
幹事 田代 晋久(信州大学)  
幹事補佐 小田原 峻也(日本電気硝子)  
委員 赤城 文子(工学院大学)  
池田 文昭(フォトン)  
岩田 圭司(日本製鉄)  
上田 靖人(東芝)  
上原 裕二(富士通)  
榎園 正人(ベクトル磁気特性技術研究所)  
川添 良幸(東北大学)  
佐藤 之彦(千葉大学)  
島村 正彦(日本電気計測器工業会)  
清水 敏久(首都大学東京)  
青木 哲也(デンソー)  
寺谷 達夫(名古屋大学)

委員 土井 祐仁(信越化学工業)  
度會 亜起(愛知製鋼)  
戸高 孝(大分大学)  
鳥居 肅(東京都市大学)  
中井 英雄(豊田中央研究所)  
中島 晋(日立金属)  
高下 拓也(JFEスチール)  
吉田 貴行(DOWAエレクトロニクス)  
林 裕希(東英工業)  
広沢 哲(物質材料研究機構)  
本蔵 義信(マグネデザイン)  
水田 貴裕(三菱電機)  
溝口 勝俊(シナノケンシ)  
山崎 克己(千葉工業大学)  
山田 隆(J S O L)  
山田 健伸(安川電機)  
山寺 秀哉(豊田中央研究所)  
山本 日登志(K R I)  
豊田 俊介(J R C M)  
細谷 達也(村田製作所)  
佐藤 敏郎(信州大学)  
村川 鉄州(日本製鉄)  
三嶋 千里(愛知製鋼)  
村松 和弘(佐賀大学)  
笹山 瑛由(九州大学)  
柳井 武志(長崎大学)  
途申退任者 中村 尚道(JFEスチール)  
馬場 拓行(DOWAエレクトロニクス)

主な参加者

途申退任者

## 1.はじめに

### 「次世代高効率モータの最近の進展」

#### 1.1. 高効率モータおよびパワーエレクトロニクス のための磁性材料開発

電気エネルギーは、力、速度、位置、温度、情報などに変換され、高応答、高効率利用であるために、国内エネルギー消費の43%で使用されている。また10年ほど前まではその3割がパワーエレクトロニクス技術を介して利用されているとされてきたが、2030年にはその割合がその8割に達するといわれており、現在まさにパワーエレクトロニクス普及期にあるといえる。さらに現在進行中の電気自動車の動きは、内燃機関からパワーエレクトロニクスで励磁される電気モータ駆動に推移する移動革命となっている。こうしたハイブリッドも含めた電動化は、自動車だけではなく、船、飛行機にもおよび一種の移動体革命といった様相を呈している。現在、化学や金属などの製造方法は、それぞれ国内エネルギー利用の15%、12%を占めているが、マイクロ波応用の研究が進められ実証化開発も行っている状況を見ると、近い将来それらの電気エネルギー、パワーエレクトロニクス応用の可能性を持っている。

パワーエレクトロニクス技術では電力用半導体のスイッチング動作により任意の電圧、周波数に高効率高応答に電力を変換できる。スイッチング動作では、ON または OFF 状態では電圧または電流がゼロ（理想状態）となるので、電力の変換効率がよい。そこでは高周波動作による小型化および大電力化による市場拡大が図られているが、そのボトルネックとなっているのが、高周波の磁性材料である。動作周波数を高周波させると小型化が実現できるが、同時に電力変換の効率が悪くなる。スイッチング損失と同時に言われているのが磁性体の損失増加である。mW クラスから MW クラスまでのパワーエレクトロニクス器を製作すると、その重量比で3-5割がインダクタ、変圧器などの磁性材料である。20kVA 無停電電源を構成する素子のコスト分析を行うと、電力用半導体や貯蔵用コンデンサよりもフィルタ用のインダクタの占める割合が大きく44%という数字が出ている。このように、小型化、損失、コストの面で高周波パワーエレクトロニクス器のボトルネックになっているのが磁性材料となっている。

更に、GaN, SiC といったワイドバンドギャップ材料を用いた素子の普及はパワーエレクトロニクス器の大容量化を可能とし、磁性材料の量産化技術を必要とする。

こうした高周波大電力向けの磁性材料としては、フェライトが主に使用されているが、飽和磁化、熱暴走、耐振動性の点で必ずしも十分とはいいがたく、金属系の材料の期待が大きい。粒子形状の磁性材料が多く研究され実用に供しており、高周波のインダクタで使用されている。しかし、

反磁界の影響で透磁率の低さが課題であり、板形状の材料開発が期待される。板形状の多結晶体は圧延しやすく高周波特性のための極薄材が可能であるが、損失の点からしたら、アモルファス、ナノ結晶材が有利といえる。それらは単ロール等での製造法を前提とすることが多いのが、製造上鋼板の厚みを薄くすることに限界が生じることが多く、製造方法も含めた材料開発が必要といえる。

磁性材料は、インダクタ、変圧器、モータなどで使用されるが、材料の磁気特性はパワーエレクトロニクス回路およびモータ駆動システムでの全体で使用され、磁気デバイスに流れる電流、印加される電圧は、回路、システム全体と共通になっている。そのため、全体の特性と磁気特性とは物理現象として一体化しているので、研究開発された磁性材料は、磁性材料や磁気デバイス単体の特性評価だけでは不十分であって、実使用条件での評価が必要である。パワーエレクトロニクス回路内における半導体と磁性材料との相互作用については、マイナーループの存在による鉄損増加、および急峻な立ち上がりによるリングングの発生とそれによる磁性材料の鉄損増加の事例も報告されている。

(藤崎 敬介)

#### 参考文献

- (1) 藤崎敬介編著「モータ駆動システムのための磁性材料活用技術」コロナ社 (2018.9)
- (2) 電磁アクチュエータシステムのための磁性材料とその評価技術調査専門委員会「電磁アクチュエータシステムのための磁性材料とその評価技術」電気学会技術報告, No. 1397, (2017.12)
- (3) 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).
- (4) Tim Heidel, "ARPA-E Initiatives in High Efficiency Power Conversion" APEC Plenary Session Ft. Worth, TX, (March 14, 2014)
- (5) 富士電機株式会社カタログ「高圧インバータ FRENIC4600FM5e」(2014a/G2007)/KO-D/CTP5EP. (2014-9)
- (6) J. W. Kolar, Future Challenges for Research and Teaching in Power Electronics, Presentation held at the 14th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2014), Brasov, Romania, (May 22-24, 2014).
- (7) J. S. Glaser, et. al. "A 900 W, 300V to 50 V dc-dc power converter with 30 MHz switching frequency," In Proc. Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition APEC 2009, pp. 1121-1128, (2009)
- (8) <https://www.electronicweekly.com/uncategorised/gan-on-si-power-transistors-french-lab-leti-2015-07/>
- (9) 藤崎敬介「マイクロ材料電磁界数値解析による高周波軟磁性材料の形状と損失特性」電気学会マグネティックス・リニアドライブ・日本磁気学会合同研究会資料, MAG-14-208, LD-14-100, (2014.12)
- (10) K. Fujisaki, "Advanced magnetic material requirement for higher efficient electrical motor design," 第38回日本磁気学会学術講演会, Symposium "Challenge of Magnetism to Improve Energy Efficiency", 4aB-2, (2014-9)
- (11) 藤崎敬介「今後の磁性材料とパワーエレクトロニクスに関して」日本磁気学会 第202回研究会, エネルギーに関連する磁性材料の現状とその展開 (ISSN 1882-2940), 202-1, pp. 1-6, 中央大学駿河台記念館, (2015.5.26)
- (12) 藤崎敬介「電磁アクチュエータシステムのための磁性材料の必要性と課題」S22(1)-S22(4) (第5分冊) 電気学会全国大会, 5-S22-1, S22-1, S22(1)-S22(4) (第5分冊), (2015.3)
- (13) 藤崎敬介「パワーエレクトロニクス進展により必要とされる磁性材料の磁気特性」電気学会マグネティックス研究会, MAG-13-149, (2013.12)