

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		4.3 高周波・高調波の磁気計測	53
「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」	3	4.4 二次元ベクトル磁気特性	
2. 磁性材料の基礎と数値解析		4.4.1 ベクトル磁気特性技術による電気機器の低損失・高効率化法	55
2.1 磁性の根源的理解	6	4.4.2 電磁アクチュエータのためのベクトル磁気特性技術	57
2.2 磁区構造と LLG 解析	7	5. 電磁アクチュエータへの応用	
2.3 多結晶と磁場解析	10	5.1 リニアドライブでの磁性材料の応用	
2.4 応力印加時の磁気特性と電磁界解析		5.1.1 多自由度電磁アクチュエータに用いられている磁性材料の現状	58
2.4.1 磁性材料の応力と時間高調波を考慮した電磁界数値解析	13	5.1.2 磁気軸受の周波数特性解析	61
2.4.2 軟磁性材料の応力印加時の磁気特性	17	5.1.3 ロータダンパによる表面磁石モータの損失低減	64
2.5 高調波特性		5.2 電気自動車における磁性材料	
2.5.1 高調波特性 1	20	5.2.1 自動車用電装部品における磁性材料	65
2.5.2 電磁鋼板の高周波モデリング	21	5.2.2 電気自動車での磁性材料の応用 1	67
2.6 ヒステリシス現象と数値解析	24	5.2.3 電気自動車での磁性材料の応用 2	68
3. 電磁アクチュエータから見た磁性材料		5.3 電磁アクチュエータでの磁性材料の応用	
3.1 軟磁性		5.3.1 エアコンにおける磁性材料の応用	70
3.1.1 Fe-3%Si (110) の磁区構造	27	5.3.2 小型モータにおける磁性材料の現状と課題	73
3.1.2 圧粉磁芯モーターと積層磁芯モーターとの特性比較	30	5.3.3 アクチュエータ用軟磁性材料の適応例	76
3.1.3 最新の軟磁性材料：アモルファス・ナノ結晶合金	34	5.3.4 鉄道における磁性材料の応用	77
3.2 硬磁性（焼結 1）		5.3.5 電磁アクチュエータでの磁性材料の応用	79
3.2.1 省希少元素組成永久磁石材料の研究開発状況と今後の展望	37	5.4 検出器・回路内への磁性材料の応用	
3.2.2 Nd 焼結磁石の動向	40	5.4.1 環境磁界発電におけるコイル・磁性材料の設計	81
4. 磁気特性の計測方法		5.4.2 パワーエレクトロニクス技術の動向と磁性材料への期待	82
4.1 JIS, IEC 規格での計測方法	42	6. おわりにおよび今後の展開	84
4.2 応力印加時の磁気計測			
4.2.1 応力印加時の磁気計測 1	47		
4.2.2 応力印加時の磁気計測 2	48		
4.2.3 アモルファス薄帯の歪み取り焼鈍と磁気特性	51		

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)
田代 晋久(信州大学)
幹事補佐 小田原 峻也(豊田工業大学)
委員 池田 文昭(フォトン)
林 裕希(東英工業)
岩田 圭司(新日鐵住金)
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)
北野 伸起(ダイキン工業)
佐藤 之彦(千葉大学)
清水 敏久(首都大学東京)
島村 正彦(日本電気計測器工業会)
妹尾 剛士(デンソー)
水田 貴裕(三菱電機)
寺谷 達夫(名古屋大学)
土井 祐仁(信越化学工業)

委員 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)
中村 尚道(JFEスチール)
長谷川昌樹(布目電機)
広沢 哲(物質材料研究機構)
本蔵 義信(マグネデザイン)
松井 啓仁(日本自動車部品総合研究所)
中島 晋(日立金属)
柳瀬 俊次(岐阜大学)
山崎 克巳(千葉工業大学)
山田 隆(J S O L)
山田 健伸(安川電機)
吉澤 佳祐(鉄道総合技術研究所)
割田 好則(シナノケンシ)
主な参加者 長谷川 均(鉄道総合技術研究所)
主な協力者 甲斐 祐一郎(鹿児島大学)
途中退任者 伊藤 栄光(東英工業)
丸川 泰弘(日立金属)
途中退任幹事 鳥居 肅(東京都市大学)

1.2 磁性体マルチスケール

1. はじめに

(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)

1.1 背景

リニアモーターカーや電気自動車といった移動手段には、電磁アクチュエータシステムが数多く使用されてきており、パワーエレクトロニクス技術をベースとした可変速制御技術により現在の高度文明を支えている⁽¹⁾。

これは、一つには電気エネルギーが、動力、位置、光、熱、冷却、情報と高度社会に必要とされる物理量に幅広く変化されるだけではなく、制御性、安全性、応答性、清潔性、可逆性といった優れた特性を有しているからである^(2,3)。更には、マイクロ波といった電磁気の有機化学や金属還元作用への応用が更なる電気エネルギーの展開として期待される^(4,5)。

このように、電気エネルギーでは図 1.1 のごとくその回路および機器において一時的に磁気エネルギーに変換して使用される。磁気エネルギーでは機器の小型高効率化のためには大きな磁束密度を必要としており、そのために、磁性材料が数多く使用されている。つまりエネルギー系の磁性材料は「磁化される」ことを利用して、以下の3種類の形態で電気エネルギーの機器の中で使用されていると考えられる^(6,7,8)。

- 1. 電気エネルギーの変換 (変圧器) : 電磁誘導作用

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \dots\dots\dots(1.1)$$

- 2. 電磁力 (モータ、発電機) : マックスウェルの応力

$$\vec{F} = \iint_{\text{ThinSteelPlate}} [T_m] \cdot \vec{n} dS \dots\dots\dots(1.2)$$

$$[T_m] = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(B_x^2 - B_y^2 - B_z^2) & B_x B_y & B_x B_z \\ B_x B_x & \frac{1}{2}(B_y^2 - B_z^2 - B_x^2) & B_y B_z \\ B_x B_x & B_x B_y & \frac{1}{2}(B_z^2 - B_x^2 - B_y^2) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1.3)$$

- 3. 蓄積 (回路中の「リアクトル」) : 磁気エネルギー

$$E = \int \vec{B} \cdot d\vec{H} \dots\dots\dots(1.4)$$

以上のごとく、今後その応用展開が益々期待される電気エネルギーでは磁性材料の利用が不可欠といえるが、その技術革新を支えているパワーエレクトロニクス技術進展に応じて磁性材料に対する要求仕様も大きく変化するものといえる。パワーエレクトロニクス技術は、一つには電力用半導体がキーとなるが、IC,LSI,IT といった情報系技術の進展をみると、益々高機能・低価格の方向に進展し、社会的に大きく普及していくものといえる。

そこで本文ではその付託に答えるべく、磁性材料の基礎現象から磁性材料の要求仕様およびそのための今後の研究課題についてまとめたので以下に述べる⁽⁹⁾。

電気エネルギー技術の進展、更なる普及により磁性材料への要求仕様も大きく変化することになるが、磁性材料を活用する電気関係者側でもその基盤現象の把握は、ともにコンカレントな研究開発するうえで重要なことといえる。

磁性材料は、その取り扱う大きさ (スケール) により、支配する物理法則が異なり、図 1.2 のごとくマルチスケールの視点で捉える必要がある⁽¹⁰⁾。

m(メートル)スケールの電気自動車は、移動手段としてニュートン力学をベースに設計され、cm(センチメートル)スケールの電気モータで駆動される。電気モータは電磁気学をベースに設計され、そのコアは磁性材料でできている。磁性材料は、mm-μm (ミリメートル-マイクロメートル) のメゾスケールの多結晶を持っていることが多い⁽¹¹⁾。多結晶は冶金学をベースとし、その結晶粒を更に微視化すると μm (マイクロメートル) のミクروسケールの磁区構造の変化で磁化過程が発生する。磁区構造は、LLG(ランダウ・リフシッツ・ギルバート) の式で支配され^(12, 13)、nm (ナノメートル) の電子のスピンにより磁化が発現される^(14, 15)。スピン構造は、原子・電子の量子力学をベースに研究がされている。

其々のスケールでは、これまで数多くの研究開発がなされてきたが、今回の電気エネルギーの要求仕様に答えるにはマクロの視点だけではなく、磁性材料といったミクロな視点が必要である。つまり異なるスケール間を適切に接続させ、電子スピン、磁区構造、多結晶の視点からマクロなモータを考えることで新たなブレークスルーが期待されるものといえる。これにより、マクロな視点での材料開発も

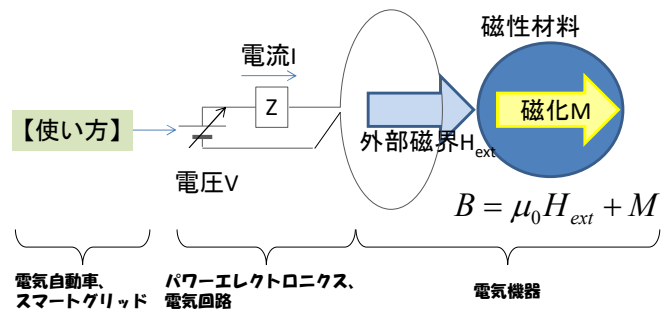


図 1.1 磁性材料と電気エネルギーとの関係
出典：藤崎敬介「電磁アクチュエータシステムのための磁性材料の必要性と課題」平成 27 年度電気学会全国大会, 5-S 22-1, S 22 (1)-S 22 (4)

Model	Super-Macro (10m-scale) Electrical Vehicle	Macro (cm-scale) Motor	Meso (mm-scale) Crystal Grain	Micro (μm-scale) Magnetic domain	Nano (nm-scale) Atomic structure
Equivalent B-H of basic structure	B-H curve of material	B-H curve of single crystal	Parameters of LLG		
Ex	Transportation	Design of motor	Crystal shape and orientation	Stoichiage, Ingredient	Spintronics
Cal	Dynamics	Motor analysis	Polycrystal model	Magnetic domain (μ-MAG, LLG)	Molecular dynamic Ab initio

図 1.2 磁性体マルチスケール
出典：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」平成 27 年度電気学会全国大会, 5-S 22-1, S 22 (1)-S 22 (4)