

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007 ～ 2009
 課題番号：19360131
 研究課題名（和文） 電気・電子機器の信頼性確保のための永久磁石熱減磁定量予測法の開発
 研究課題名（英文） Development of Prediction Method of Thermal Flux Loss in Permanent Magnet Used in Electrical and Electronic Devices
 研究代表者
 福永 博俊（FUKUNAGA HIROTOSHI）
 長崎大学・工学部電気電子工学科・教授
 研究者番号：10136533

研究成果の概要（和文）：電気電子機器内に使用される永久磁石で生じる熱減磁を，有限要素法を用いて予測する方法を開発した。開発した方法は，磁石の着磁過程における磁化分布の解析（Step 1），着磁後の磁気特性分布の決定（Step 2），室温及び使用最高温度における磁化分布の解析（Step 3），減磁量の決定（Step 4）から構成されている。開発した予測法を，DC サーボモータ内に使用される 10 極着磁の Nd-Fe-B 系ボンド磁石に適用し，予測値と実験値がほぼ一致することを確認した。

研究成果の概要（英文）：We developed a technique to predict flux loss of a magnet used in electrical and electronic devices with a complicated magnetization pattern. The developed method uses the finite element method and consists of four steps. At first, the distribution of magnetization under magnetizing field is analyzed (Step 1), and a demagnetization curve of each element is deduced from the results of the first step (Step 2). Subsequently, the distributions of magnetization at room and elevated temperatures are analyzed by using demagnetization curves determined in Step 2 (Step 3). In Step 4, the distribution of flux loss due to exposure at the elevated temperature is predicted based on a physical model by using the results in Step 3. We applied this technique to a Nd-Fe-B ring shaped magnet with 10 poles, and confirmed that the predicted flux loss values agreed with those obtained experimentally.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2008年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	12,700,000	3,810,000	16,510,000

研究分野：磁気工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電気機器工学

キーワード：電子デバイス・機器磁石，回転機，減磁，有限要素法，磁界，電子・電気材料

1. 研究開始当初の背景

(1) Nd-Fe-B磁石の発見、電動機等への応用と問題点

1983-1984年に発明された $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ を主相とする Nd-Fe-B 磁石は、従来のSm-Co系磁石を遥かに凌ぐ磁石特性を有すると共に、資源的にも豊富であることから、希土類高性能磁石の電気・電子機器への応用が急速に広がった。生産量の増加は平成14-17年の平均で年率約9%であった。

一方、Nd-Fe-B 系磁石の使用が増すにつれて深刻な問題も発生してきた。 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ のキュリー温度(312 K)は、SmCo 系磁石のキュリー温度に比べて遥かに低く、Nd-Fe-B 磁石が高温に曝された際に、磁石内の一部で磁化の反転が生じ、磁石が発生する磁束の減少(熱減磁と呼ばれる)が問題となった。機器の信頼性を確保するためには、減磁を予測すると共に、低く抑えることが不可欠である。特に、自動車への応用においては、永久磁石が高温に曝される機会が多く、現在では、約10%のNdを貴重な資源であるDyで置換して、室温での保磁力を十分に高め、減磁を抑制している。しかしながら、Dyの市場供給量はNdの10%より低いので、Dy価格の高騰が懸念されると共に、将来的には資源枯渇も懸念される状況になり急速に問題意識が広がっていた。

(2) 国内外での減磁への取組

このような状況下で、2つのアプローチが必要である。その一つは、Dy-free 或いはDy-lessで減磁に耐える高保磁力を有する磁石を開発することである。この目的に特化したプロジェクトは、既にNEDOの課題としても採択されている。

もう一つのアプローチは、減磁の予測とそれを抑制する機器の設計である。そのために、減磁の評価と予測がその重要性を増し、申請者らも 1989 年より、減磁の系統的な研究をスタートさせた。一方、市場には多様な磁石が存在するばかりでなく、同じ Nd-Fe-B 系磁石であっても、組成、磁石の作成方法、形状等により減磁特性が異なる。したがって、個人レベルの研究では市場の磁石を網羅する研究を遂行する上での限界も存在していた。そこで、我が国では、電気学会マグネティクス技術委員会内の永久磁石に関する調査専門委員会においては、参加委員による分担実験を1988年よりスタートし、基礎データの蓄積が進んでいた。

当時の取組においては、電気学会の取組も含めて、円筒形磁石に対する減磁の評価が行われていた。しかしながら、実際の電気・電子機器に使用される磁石の形状は複雑である。減磁の大小は、磁石の形状に依存するので、円筒形に磁石に対する評価結果から電

気・電子機器内での減磁の大きさを見積もることはできない。従って、円筒形磁石での評価結果は、機器内での減磁の大小に関する定性的情報を与えているにすぎず、減磁の評価は、実際に機器を作り高温に曝して実験しているというのが現状であった。このような状況では、減磁を抑制する機器設計を効率的に行うことは困難であり、減磁の予測技術にはほとんど手を付けられていない状況であった。

(3) 申請者らの取組み

前述した様に、申請者らは 1989 年より、Nd-Fe-B 系磁石の減磁の評価に取り組んで来た。一連の研究の中で、系統的減磁評価から減磁の物理的法則を見だし、減磁の予測を可能にする方法の研究に力を注いできた。この結果、1999年には永久磁石の磁化曲線と磁石のパーミアンス(磁石内の反磁界を与える係数で、磁石の形状に依存する)から初期減磁を予測する方法を提案した。提案した方法では、室温及び暴露温度での磁化曲線、残留磁化の温度依存性、磁石のパーミアンスから、単純な形状を有する磁石については、初期減磁を解析的に計算することができる。その後、種々の磁石において提案の方法の有効性を確認した。しかしながら、提案の方法の適用範囲は、単純な形状を有する磁石に限られており、実際の電気電子機器に使用される複雑な形状と着磁パターンを有する磁石に於ける減磁を予測するまでには至っていなかった。

2. 研究の目的

電気・電子機器に使用されている複雑な形状と着磁パターンを有する磁石における減磁を予測するには、着磁過程に依存する磁気特性及び局所的に異なる反磁界の大きさを考慮できる減磁予測法を開発する必要がある。そこで、本研究では、有限要素法による反磁界の計算(パーミアンスの計算)と物理的考察に基づく減磁の解析的計算法を融合させるとともに、磁石の着磁過程のシミュレーションを有限要素法に取り込み、電気・電子機器内に組み込まれた磁石における初期減磁を、定量的に予測する技術を開発する。さらに、その有効性を実験的に検証し、従来のカット・アンド・トライ方式による機器開発を効率化することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、以下に示す減磁予測法を開発した。

Step 0: 磁石特性の決定と数式表現

着磁磁界を変化させた際の対象磁石の減

磁曲線を決定し、関数近似する。

Step 1: 有限要素による着磁過程の解析

対象磁石の着磁モデルを構築し、有限要素法を用いた着磁プロセスをシミュレーションし、磁石の各部（有限要素法の各要素）が経験する最大磁界の分布を明らかにする。

Step 2: 磁気特性分布の決定

Step 1において解析した最大磁界の分布から磁石各部の磁気特性を決定する。

Step 3: 有限要素による磁石内磁化分布の解析

Step 2において決定した磁石特性を用いて、機器内に設置された磁石の磁化分布を解析する。解析は、室温及び暴露温度（磁石が経験する最高温度）に対して行う。

Step 4: 減磁分布の解析

Step 3で解析した磁化分布の解析結果をすでに明らかにしている減磁の物理的モデルの入力値とし、

$$(FL)_{int_cal_i} = 1 - \frac{I_{wi}(T_{EX})}{I_{wi}(T_{RT})\{1 - \alpha_i(T_{RT} - T_{EX})\}}$$

から磁石確間で減磁量を決定する。ここで、 $I_{wi}(T_{RT})$ 、 $I_{wi}(T_{EX})$ は、 i 番目の要素の室温 T_{RT} 及び暴露温度 T_{EX} での動作点における磁化の値、 α_i は残留磁化の温度係数である。

4. 研究成果

開発手法の有効性を検証するために、図に示すDCモータ内の10極着磁したリング磁石について、開発手法で初期減磁を予測するとともに、減磁量を実測して予測結果と比較検討した。使用した磁石はNd-Fe-B系等方性ボンド磁石、暴露温度は120とした。また、予測値と実験値の比較を可能とするために、モータから回転子とアウターヨークを取り除いた状態で、120での高温暴露を行った。

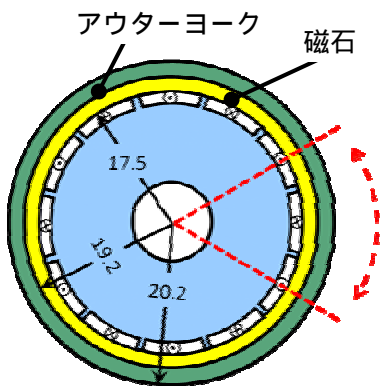


図1 開発手法を適用したモータモデル

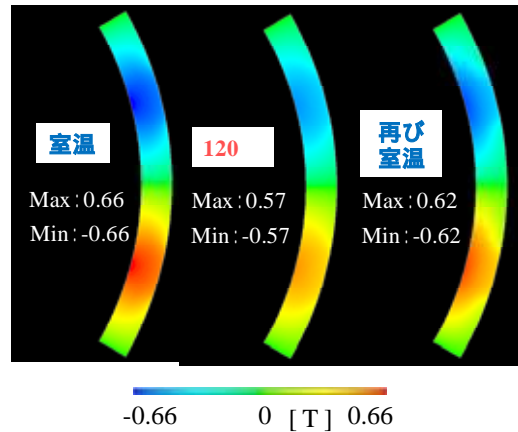
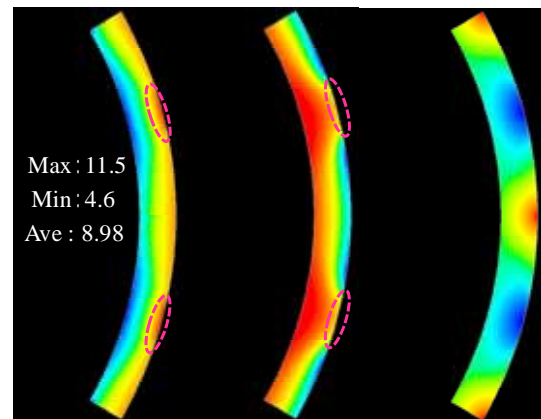


図2 室温及び120での磁化の径方向成分



(a) 減磁率 (b) 保磁力 (c) 反磁界

図3 磁化の垂直方向成分に対する初期減磁率の分布

図2に、リング磁石内の磁化の同径方向成分を2極分について示す。磁化の同径成分は磁極の中心で最大となる。その大きさは、着磁後の室温状態では、0.66 [T] である。磁石を120まで昇温すると、その値は0.57 [T] まで減少し、磁石を再度室温の戻しても0.62 [T] までしか回復しない。

昇温前後の磁化の分布から初期減磁率を計算した結果が図3(a)である。初期減磁率 FL_m は

$$FL_m = (M_1 - M_0) / M_0 \times 100 [\%] \quad (1)$$

と定義している。ここで、 M_0 と M_1 は暴露前後の磁化である。

初期減磁率は磁石の内側では4~8%、外側では10~12%となった。この分布と室温に於ける磁石の保磁力(図3(b))および反磁界の大きさ(図3(c))を比較すると、着磁後の保磁力が低く、反磁界の大きな部分で初期減磁が大きくなっていることが了解される。

本研究で開発した減磁予測法の有効性を確認するために、リング磁石内側表面の磁束

密度（磁石表面に垂直な成分）をホール素子により測定し、予測値と比較した。その結果を図 4(a), (b)に示す。120 °での暴露前後とも、測定値と解析値が良く一致していることが了解される。実測値と予測値の波形の面積の誤差を

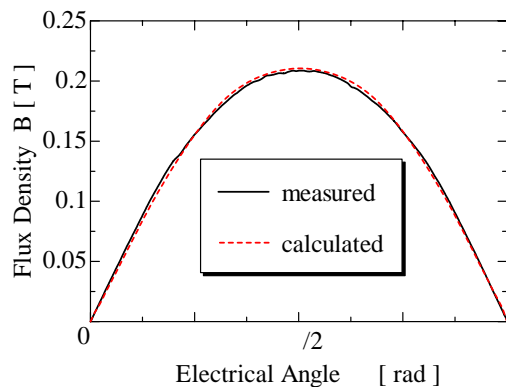
$$\text{誤差} = (\text{実験値} - \text{予測値}) / (\text{実験値}) \quad (2)$$

と定義すると、誤差は、熱暴露前後で、それぞれ、1.01%、1.61%となり、予測値と実測値が良く一致していることが確認された。

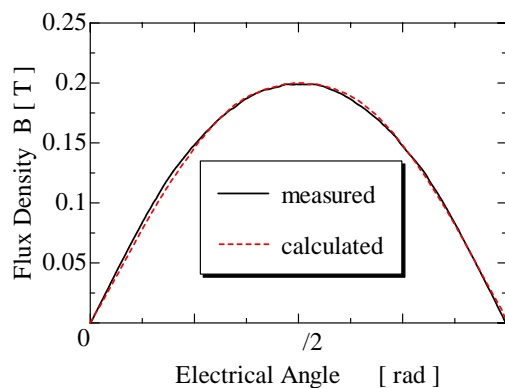
図 5 には、磁石内側表面での初期減磁率の予測値及び実験値を示している。初期減磁率 FL_B

$$FL_B = (B_1 - B_0) / B_0 \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

と定義している。ここで B_0 と B_1 は磁石表面における暴露前後の磁束密度の垂直成分である。図に見られるように、磁極の端部で初期減磁の実験値が極端に大きくなっている。これは端部では磁束の垂直成分が 0 となり、(3)式で定義される FL_B が発散するためである。端部での磁束密度は小さいので、この部分の減磁率は大きくても熱暴露前後での磁束密度の変化量は小さく、実用上は問題とな



(a) 熱暴露前の磁束波形



(b) 熱暴露後の磁束波形

図 4 熱暴露前後の磁束波形

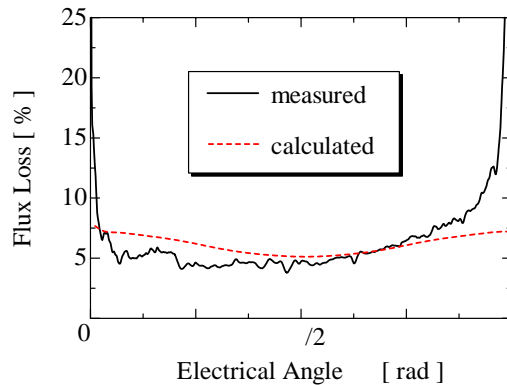


図 5 初期減磁率の予測値と実測値の比較

らない。 FL_B が発散する磁極端部を除き、電気角が $\pi/6 \sim 5\pi/6$ の範囲で減磁率の平均は 5.43% となった。

一方、予測値は磁石端部でも有限の値となるが、端部で増加する傾向は実験値と一致している。電気角が $\pi/6 \sim 5\pi/6$ の範囲での予測減磁率の平均は 5.73% となり、実験値とおおよそ一致した。

このことは、開発予測法が、今後実機で使用される様々な形状、特性を有する磁石の熱減磁率予測に応用可能であり、電気電子機器等の信頼性向上に寄与することを示唆している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

H. Fukunaga and T. Yamaguchi, Improvement in soft magnetic properties using magnetostriction, J. Magn. Magn. Mater. (査読あり), Vol.316 (2007) pp.e632–e635.

T. Yanai, A. Shimada, K. Takagi, K. Takahashi, M. Nakano, H. Fukunaga, Magnetic properties of Fe-based toroidal cores prepared by continuous Joule heating under tensile stress, Journal of Applied Physics (査読あり), Vol.101 (2007) pp.09N-110-1~3.

T. Yanai, K. Takagi, A. Shimada, K. Takahashi, M. Nakano, Y. Yoshizawa, H. Fukunaga, Fabrication of Fe-Based Ribbon with Controlled Permeability by Joule Heating under Tensile Stress, J. Magn. Magn. Mater. (査読あり), vol.320 (2008) pp.e833–e836.

K. Takagi, T. Yanai, K. Takahashi, M. Nakano, Y. Yoshizawa, H. Fukunaga, Magnetic properties of

Fe-based ribbons with controlled permeability prepared by continuous pulse annealing under tensile stress, Journal of Applied Physics (査読あり), Vol.105 (2009) pp. 07A331-1 ~ 3.

H. Fukunaga, H. Koreeda, T. Yanai, M. Nakano, F. Yamashita, Prediction of flux loss in a Nd-Fe-B ring magnet considering magnetizing process, Journal of Physics: Conference Series (査読あり), Vol.200 (2010) pp.082006-1 ~ 4.

F Yamashita, O Yamada, S Ohya, O Kobayashi, M Nakano, H Fukunaga, Preparation of ring-shaped composite bonded magnets with continuously controlled anisotropy distribution for internal space, Journal of Physics: Conference Series (査読あり), Vol.200 (2010) pp.082027-1 ~ 4.

H. Fukunaga, H. Murata, T. Yanai, M. Nakano, F. Yamashita, Prediction method of flux loss in anisotropic NdFeB/SmFeN hybrid magnets, Journal of Applied Physics (査読あり), Vol.107 (2010) 掲載決定.

〔学会発表〕(計 12 件)

相良彰吾, 豊田昭仁, 柳井武志, 中野正基, 福永博俊, 山下文敏, 二層構造を有する永久磁石の熱安定性に関する検討, 第 31 回日本応用磁気学会学術講演会, 平成 19 年 9 月 14 日, 東京.

柳井武志, 大宅敏郎, 高橋賢一郎, 中野正基, 福永博俊, 応力下パルス熱処理を施した Fe 系薄帯, 平成 20 年電気学会全国大会, 平成 21 年 3 月 19 日, 福岡.

高木孝太郎, 柳井武志, 高橋賢一郎, 中野正基, 福永博俊, 応力下パルス熱処理により作製した透磁率制御 Fe 系薄帯の磁気特性, 平成 20 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 平成 20 年 8 月 21 日, 千葉.

村田浩紀, 柳井武志, 中野正基, 山下文敏, 福永博俊, 異方性 HDDR-NdFeB/RD-SmFeN Composite ボンド磁石の初期減磁の予測, 第 61 回電気関係学会九州支部連合大会, 平成 20 年 9 月 25 日, 大分.

K. Takagi, T. Yanai, K. Takahashi, M Nakano, Y. Yoshizawa and H. Fukunaga, Magnetic properties of Fe-based ribbons with controlled permeability prepared by continuous pulse annealing under tensile stress, 53rd Annual Conf. on Magnetism and Magnetic Materials, 平成 20 年 11 月 11 日, Austin (USA).

村田浩紀, 高橋賢一郎, 柳井武志, 中野正基, 福永博俊, 山下文敏, 異方性 HDDR-NdFeB/RD-SmFeN コンポジットボンド磁石の熱減磁の予測に関する検討, 電気学会マグネティクス研究会, 平成 20 年 12 月 4 日, 東京.

是枝弘行, 成清将平, 柳井武志, 中野正基, 福永博俊, 山下文敏, 着磁過程を考慮した永久磁石の熱減磁予測, 平成 21 年電気学会全国大会, 平成 21 年 3 月 19 日, 札幌.

H. Fukunaga, H. Koreeda, T. Yanai, M. Nakano, F. Yamashita, Prediction of Flux Loss in A Nd-Fe-B Ring-Magnet Considering Magnetizing Process, Inter. Conf. on Magnetism 2009, 平成 21 年 7 月 27 日, Karlsruhe (ドイツ).

F Yamashita, O Yamada, S Ohya, O Kobayashi, M. Nakano, H. Fukunaga, Preparation of ring-shaped composite bonded magnets with continuously controlled anisotropy distribution for internal space, Inter. Conf. on Magnetism 2009, 平成 21 年 7 月 27 日, Karlsruhe (ドイツ).

是枝弘行, 成清将平, 柳井武志, 中野正基, 福永博俊, 山下文敏, 着磁過程を考慮した永久磁石の熱減磁予測, 日本磁気学会第 33 回学術講演会, 平成 21 年 9 月 12 日, 長崎.

是枝弘行, 柳井武志, 中野正基, 福永博俊, 山下文敏, 着磁過程を考慮したリング磁石の熱減磁予測法, 電気学会マグネティクス研究会, 平成 21 年 12 月 3 日, 東京.

H. Fukunaga, H. Murata, T. Yanai, M. Nakano, F. Yamashita, Prediction method of flux loss in anisotropic NdFeB/SmFeN hybrid magnets, 11th MMM-Intermag Joint Conference, 平成 22 年 1 月 20 日, Washington D.C. (USA).

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.eee.nagasaki-u.ac.jp/~magnet/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
福永 博俊 (FUKUNAGA HIROTOSHI)
長崎大学・工学部電気電子工学科・教授
研究者番号: 1 0 1 3 6 5 3 3

(2) 研究分担者
中野 正基 (NAKANO MASAKI)

長崎大学・工学部電気電子工学科・准教授
研究者番号：20274623

柳井 武志 (YANAI TAKESHI)
長崎大学・工学部電気電子工学科・助教
研究者番号：30404239