



圧粉磁心の動作時印加応力環境下における磁気特性評価

吉川浩平*・山田幸伯・山本伸一郎
餅田恭志・大橋紳悟・福永由加
澤井孝典・藤原耕二・石原好之

Evaluation of Magnetic Properties of Soft Magnetic Powder Core Under Mechanical Stress — by Kohei Yoshikawa, Yukinori Yamada, Shinichiro Yamamoto, Yasushi Mochida, Shingo Ohashi, Yuka Fukunaga, Takanori Sawai, Koji Fujiwara and Yoshiyuki Ishihara — In electromagnetic equipment, laminated steel sheets and soft magnetic powder core are used as the magnetic core in electromagnetic circuit. Soft magnetic powder core has three advantages over conventional magnetic core, which are three-dimensional formability, three-dimensional flux capability and material recyclability. Due to these advantages, soft magnetic powder core is being expected to be used as a new soft magnetic material in recent studies. Driving performance and efficiency in electromagnetic equipment are affected by the magnetic properties of core materials. In the manufacturing process of motors, mechanical stress caused by shrink fit and caulking is applied onto motor core. The magnetic properties of core are degraded by mechanical stress. In this study, the effect of mechanical stress on the magnetic properties of motor core is examined in detail.

1. 緒言

モータやリアクトルなどの電磁部品の鉄心材料として用いられる圧粉磁心材料^{*1}は、絶縁皮膜を施した軟磁性粉末を加圧成形することにより得られ、複雑形状をもつ電磁部品を1回の加圧成形にて製品形状に近い成形体を得ることが可能であることから、近年電磁部品への応用が広く注目を集めている。また、従来の電磁鋼板と比較し、磁気等方性を有することから三次元的な磁気回路設計への対応が可能であり、電磁部品の小型・軽量化への寄与が期待されている。さらに、加圧粉碎が可能であり、コア材料のリサイクル性が期待されている。

鉄心として用いられる軟磁性材料の磁気特性は電磁部品の効率や駆動性能に大きく関係するが、電磁部品の製造工程において、鉄心形状への加工工程での切断、切削加工や表面処理による圧縮応力や引張り応力、また、組立工程でのハウジングとの焼きばめ^{*2}や、かしめ^{*3}による機械的応力など、種々の応力が鉄心に加わり、これらの応力によって磁性材料の磁気特性が変化することで、電磁部品の性能や効率に影響を与えることが問題となる。したがって、軟磁性材料に加わる応力と磁気特性との関係を十分に把握しておかなければならない。しかしながら、一般的な電磁部品の設計や評価には、主に外部からの応力印加がない状態での軟磁性材料の磁気特性を用いて行われていた。

筆者らは、電磁部品の設計や評価の精度を向上し、より高効率な製品の開発を行うために、電磁部品の鉄心として用いられる場合の応力印加を考慮した特性評価を実施することとした。

磁性材料に応力を印加した状態での影響評価について

は、電磁鋼板単板に対しての圧縮・引張り応力下における磁気特性を評価する研究がなされてきた^{(1)~(3)}。しかしながら、圧粉磁心や電磁鋼板単板を積層した、より鉄心状態に近い試料に対して圧縮・引張り応力下での磁気特性を評価した報告例は少ない。

本報では圧粉磁心に対し、(1) モータ組立時に鉄心に印加される応力の推定、(2) 応力印加状態における磁気特性評価法および評価装置の開発、(3) 応力印加が磁気特性に及ぼす影響評価を行った。また、圧粉磁心の使用目的により材料の密度や構成される軟磁性粉末の粒径が調整されることを考慮し、圧粉磁心の成形体密度や粉末粒径が応力印加状態での磁気特性に及ぼす影響を検討した。さらに、電磁鋼板と圧粉磁心の応力印加状態での磁気特性を比較し、考察を行った。

2. モータ構造での応力分布状態

上述した応力印加と磁気特性との関係を詳細に検討するに際し、焼きばめや、かしめによる締結が行われたモータの応力分布について詳細に検討した。この締結工程において鉄心材料へ加わる応力はモータ形状により異なるが、シミュレーションと実測により引張り応力で0~50MPa程度、圧縮応力で0~150MPa程度印加されることを確認した。ここではモータコアの簡易モデルにおける応力分布をMSC Nastran RT^{*4}を用いて実施した事例について述べる。

図1は解析に用いた鉄心モデルの形状を示す。図1は外径119mmの固定子の直径方向に対し、0.3mmの締め代を

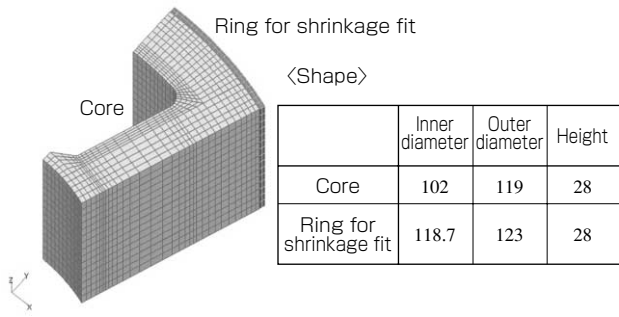


図1 簡易モータの焼きばめ応力解析モデル

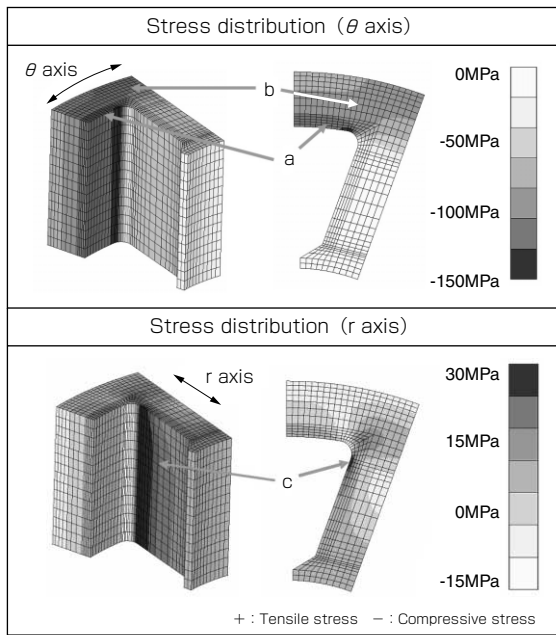


図2 簡易モータモデルの応力解析結果

もつリングで焼きばめを行ったモデルである。このモデルを用いた応力分布のシミュレーション結果を図2に示す。図2の結果より、モータのバックヨーク^{*5}部の大部分(図中a)に100MPaの円周方向(θ 方向)の圧縮応力が分布しており、バックヨーク部の内径側の部分(図中b)に125MPaの大きな圧縮応力(θ 方向)が分布していることがわかる。また、バックヨーク部とティース^{*6}部のつなぎ部近傍(図中c)に30MPaの直径方向(r方向)の引張り応力が分布していることがわかる。これらのシミュレーション結果から、焼きばめにより発生する応力の影響は、バックヨーク部では θ 方向の圧縮応力として、またティース部でr方向の引張り応力として影響すると考えられる。一方、モータの主な磁束の方向はバックヨーク部では θ 方向に、ティース部ではr方向となる。これらのことから、磁束の方向と焼きばめにより生じる応力方向がほぼ一致していることがわかる。電磁鋼板においては圧縮応力により磁気特

性の劣化が知られており^{(1)~(3)}、本研究では、とくにバックヨーク部に生じる圧縮応力に着目し、応力の印加方向と磁束の方向を合わせ、圧縮応力状態での磁気特性の変化を評価することとした。

3. 応力環境下での圧粉磁心の磁気特性評価法の開発

3-1 実験試料 圧粉磁心は他の磁性材料と同様、切削等の機械加工により磁気特性が大きく変化する。そこで本実験においては、これらの影響を小さくするため金型成形により直方体の試料を作製した。試料の形状は図3に示す断面が $10 \times 10\text{mm}$ 、長さ 55mm であり、図中に示すように、試料の長手方向に磁路を取り、磁路と平行方向に外部から一様の応力を印加した状態での磁気特性評価を行った。

評価した試料の詳細を表1に示す。磁性材料は使用目的により駆動周波数や要求強度が異なるため、成形体密度や材料に用いる軟磁性粉末の粒径等を調整した試料を実験に用いた。また比較材として一般的にモータリアクトルに用いられている2種類の電磁鋼板を用いた。

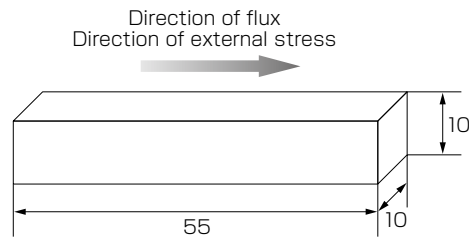


図3 実験試料の形状および、試料中の磁束の流れの方向と応力印加の方向

表1 実験試料の仕様

Sample name	Average particle size [μm]	Density of TP [Mg/m^3]
Sample 1	250	7.57
Sample 2	250	7.45
Sample 3	250	7.30
Sample 4	100	7.42
Sample 5	50	7.43

3-2 応力印加機構 応力印加は図4に示すように、試料の片側を固定端とし、片側から油圧シリンダを用いて圧縮応力を印加した。引張り応力は試料の両端に引張り治具を接着し、この引張り治具を介しバイス上で試料の長手方向と平行に印加した。

3-3 磁気特性評価装置の構成 図4に磁気特性評価装置の概略図を示す。ここでは磁気特性評価のための閉磁路を形成する必要があるため、巻鉄心のカットコアを用

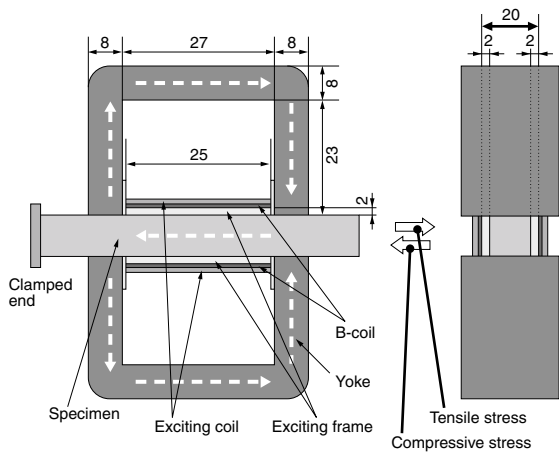


図4 応力印加状態における圧粉磁心の磁気特性評価法

い、試料の上下から挟み込み、閉磁路を形成したダブルヨーク式とすることで試験部の磁束の均一化を図った。

磁気特性評価のための磁路長は、励磁コイルが巻かれている試料中央の25mmの間隔を用い、測定部位全域に誘起電圧測定用コイル（Bコイル）を1層20ターンで巻き、その上から励磁用コイルを1層あたり25ターンで2層に均等に巻いた。この状態で励磁コイルに電流を流し、Bコイルに発生する誘起電圧から試料の磁束を算出した。また、Bコイル波形が正弦波となるように磁束正弦波制御での評価を実施した。

上記の測定装置を用い、実験に供した直方体の試料の長手方向の磁束密度分布を確認したところ、測定部での磁束密度の変化は1.5%以内であり、磁束分布が均一であるとして扱えることが確認できた⁽⁴⁾。

鉄損^{*7}の測定は閉磁路形成用のヨークと試料の合計値で得られるが、評価後、ヨークのみの損失を差し引くことで、試料のみの損失を算出した。得られた損失を、正弦波状磁場を与えた時の鉄損の式⁽⁵⁾を用いて、ヒステリシス損^{*8}と渦電流損^{*9}に分離し、損失変化に寄与する成分を考察した。

4. 実験結果

4-1 実験条件 3-3に示した評価装置を用い、表2に示す磁束密度、周波数、応力印加条件での実験試料の磁気特性の評価を行った。

表2 実験条件

Flux density [T]	0.5, 1.0, 1.2
Frequency [Hz]	50, 100, 400, 800, 1k
Stress [MPa]	Compressive stress 0, -25, -50, -100, -150 Tensile stress 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0

ここでは、応力印加の影響を無負荷時の損失を基準に規格化し、無応力下での鉄損との比で評価した。

4-2 実験結果 図5には実験試料の応力印加状態のヒステリシスループ^{*10}を示す。この結果から圧縮応力による透磁率^{*11}の低下と保磁力^{*12}の増加がみられ、圧縮応力により磁気特性の劣化が明らかとなった。これは従来の電磁鋼板の研究結果^{(1)~(3)}と同様の傾向である。一方、Sample 1の各圧縮応力下での周波数特性、および磁束密度特性の変化を図6、図7に示す。図6、図7からわかるように、周波数および、磁束密度が増加するにつれて、鉄損が増加している。また、周波数特性に関しては、応力印加の影響により鉄損の増加幅が大きくなっている。

次に、粒径を変化させた実験試料の鉄損の評価結果を図8に示す。図8からわかるように、圧粉磁心の粒径にかかわらず、圧縮応力印加により鉄損が増加し、引張り応力印加により鉄損が減少している。この結果も電磁鋼板の研究結果^{(1)~(3)}と同様の傾向を示している。粒径を変化させた試料について考察すると、平均粒径100 μ mの圧粉磁心

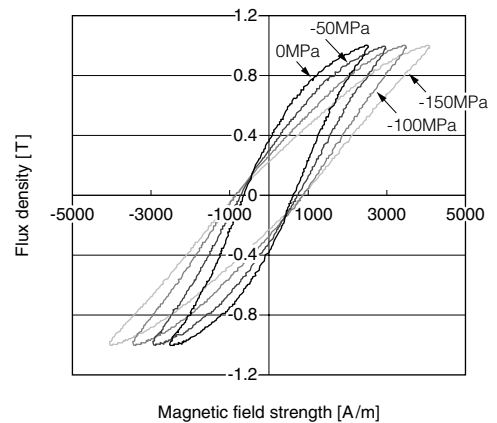


図5 圧縮応力下での圧粉磁心のヒステリシスループ (Sample 1, 1kHz)

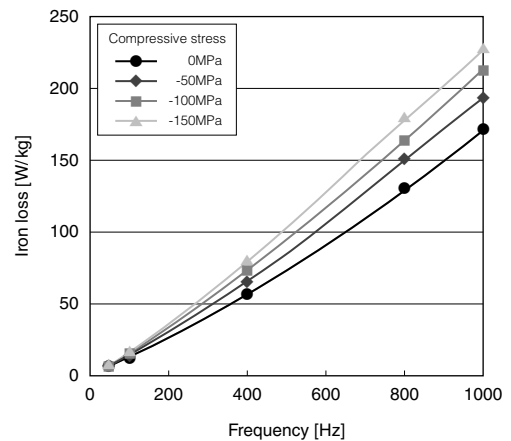


図6 圧縮応力下での圧粉磁心の鉄損の周波数特性 (Sample 1, 1T)

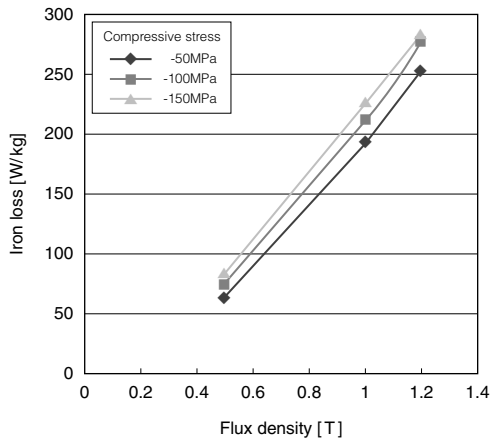


図7 圧縮応力下での圧粉磁心の鉄損の磁束密度特性 (Sample 1, 1kHz)

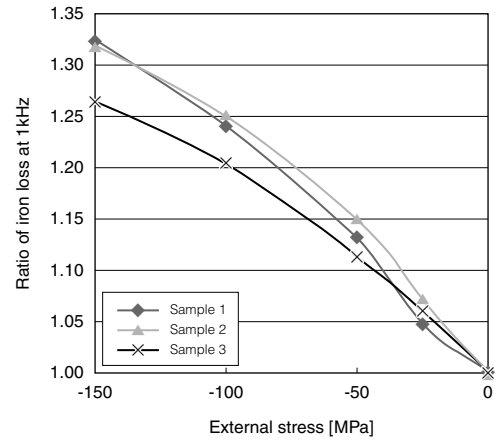


図9 圧粉磁心の規格化した鉄損比の応力印加特性 (成形体密度比較, 1kHz, 1T)

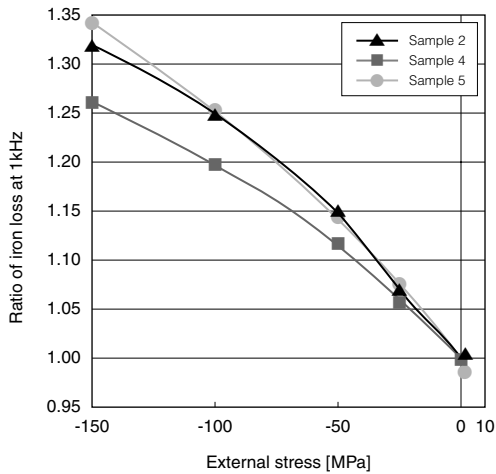


図8 圧粉磁心の規格化した鉄損比の応力印加特性 (粉末粒径比較, 1kHz, 1T)
 * 1 規格化した鉄損比: 無応力印加での鉄損を1とした時の比。
 * 2 図中の応力印加の符号: 正=引張り応力, 負=圧縮応力。

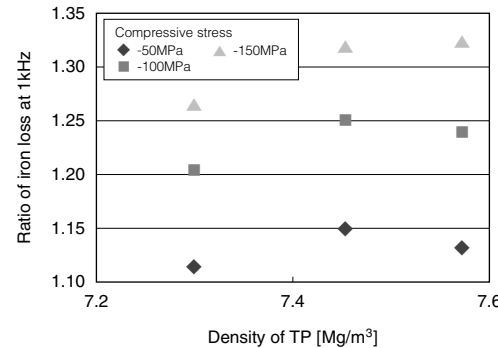


図10 圧粉磁心の規格化した鉄損比の成形体密度特性 (1kHz, 1T)

(Sample 4) の応力に対する鉄損増加が小さい傾向を示す。Sample 4はバインダ樹脂を多く含んだ試料となっており、この樹脂が応力を緩和することで鉄粉に対する応力の影響を減少させたと考えられる。本結果から、鉄損と応力印加との関係に粒径が及ぼす影響は少ないと考えられる。

次に、成形体密度が鉄損と応力印加との関係に及ぼす影響を図9に示す。図9からわかるように、成形体密度にかかわらず圧縮応力印加により鉄損が増加している。また、試料の成形体密度が、鉄損と応力印加の関係に及ぼす影響は、成形体密度が低い領域では顕著であるが、成形体密度が高くなると影響は小さい。そこで成形体密度と鉄損変化の比の関係を整理し図10に示す。成形体密度と鉄損変化の比が成形体密度が低い領域では増加傾向にあるが、成形体密度が7.4Mg/m³以上の領域ではほぼ一定になっている。これは密度が低い領域では鉄粉間の隙間が大きく、応力印

加に対しての変形能をもっており、応力印加の影響を緩和しているものと考えられる。

5. 考察

実験結果より得られた応力印加の磁気特性への影響要因を考察するため、係数分離によりヒステリシス損 (Wh)、渦電流損 (We) の印加応力による変化を評価した。ヒステリシス損と渦電流損の変化量に粒径が及ぼす影響について図11に示す。図11からわかるように、圧粉磁心の粒径にかかわらず、圧縮応力印加によりヒステリシス損が増加している。ヒステリシス損増加に関しては、図5に示したように、透磁率低下、保磁力増加が確認できていることから、圧縮応力印加により鉄粉内部に歪みが生じたためと考えられる。

一方、図11からわかるように渦電流損はばらつきが大きい。ヒステリシス損と比べて、応力印加による影響が小さいと考えられる。渦電流損は、比抵抗に相関があることから比抵抗の変化について評価を加えた。比抵抗の測定法は、四端子法を用いた。比抵抗の評価結果を図12に示

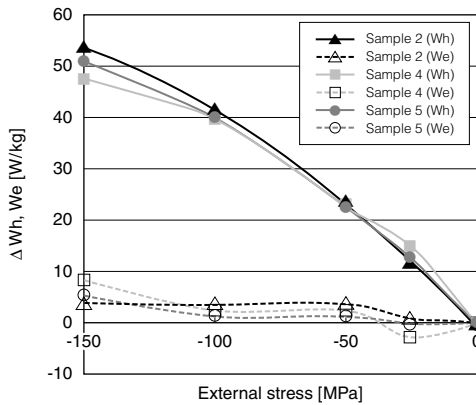


図 11 圧粉磁心のヒステリシス損変化および、渦電流損変化の応力印加特性 (1kHz、1T)

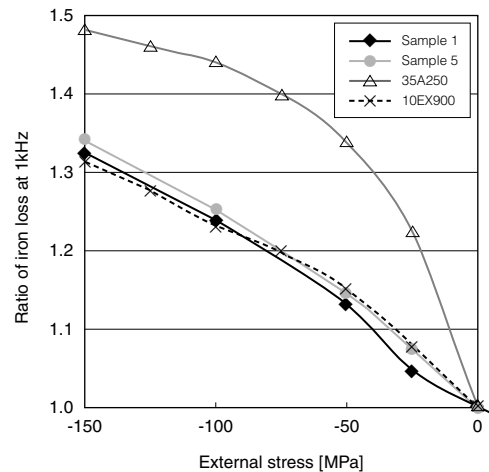


図 13 電磁鋼板と圧粉磁心の規格化した鉄損比の応力印加特性の比較 (1kHz、1T)

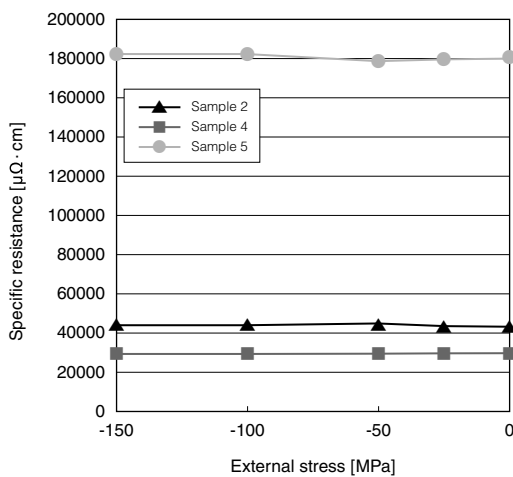


図 12 圧粉磁心の比抵抗の応力印加特性

す。図 12 より応力印加に対して比抵抗の変化は小さく、渦電流損の変化はほとんどないことがわかる。以上の結果より、圧縮応力印加が渦電流損に及ぼす影響は極めて小さいと考えられる。

以上の検討をまとめると、応力印加により鉄損が増加する主な要因はヒステリシス損の増加であり、この増加は応力印加により鉄粉に歪みが生じているためと考えられる。

6. 電磁鋼板との比較

モータ、リアクトルなどに用いられる代表的な電磁鋼板 (35A250、10EX900) と圧粉磁心の印加応力による鉄損特性の比較結果を図 13 に示す。本結果より鉄損比で比較するとモータ用電磁鋼板 (35A250) に対し圧粉磁心 (Sample 1) の鉄損増加率が 20% 程度小さく、圧粉磁心は応力印加に対する鉄損劣化が小さい材料であると考えられる。一方

リアクトル用電磁鋼板 (10EX900) は圧粉磁心と鉄損増加率がほぼ同等となっている。

7. 結 言

本報では圧粉磁心への応力印加が磁気特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、(1) モータ組立時に鉄心に印加される応力の推定、(2) 応力印加状態における磁気特性評価法および評価装置の開発、(3) 応力印加が磁気特性に及ぼす影響評価、の 3 点を行った。これにより以下の結果を得た。

- ① 圧粉磁心は、圧縮応力印加により、電磁鋼板と同様に透磁率が低下、保磁力が増加し、鉄損が増加する特性を示す。
- ② 圧粉磁心の成形体密度、軟磁性粉末の粒径の差異が応力印加による鉄損の変化に及ぼす影響は小さい。
- ③ 圧粉磁心の応力印加による磁気特性の低下の主な要因はヒステリシス損の増加である。
- ④ 圧粉磁心は、モータ用途で用いられる電磁鋼板に対して、応力に対する鉄損劣化が小さい。

以上の結果より、モータ組立時に圧縮応力が印加されるバックヨーク部に圧粉磁心を適用し、組立応力による鉄損増加の抑制と三次元磁気回路の効果を活用することが小型高効率モータの設計に有効であると考えられる。

用語集

※1 圧粉磁心

絶縁被膜を施した軟磁性粉末を加圧成形して得られる素材

※2 焼きばめ

円形に配列した構造物をリング締結するための手段。円形に配列した構造物の外径よりも、リング内径を少しだけ小さくし、リングを加熱膨張させてリング内径を円形に配列した構造物の外径よりも広げた状態でリング内に構造物を嵌め込み、その後冷却して吻合すること

※3 かしめ

二つ以上の物体を締結する手段。外部から力をかけ、塑性変形させて吻合すること

※4 MSC Nastran

構造解析を行うために開発された有限要素解析ソフトウェア。

・Nastranは、NASAの米国及びその他の国における商標または登録商標です。MSCは、MSC Softwareの米国及びその他の国における商標または商標登録です。

※5 バックヨーク

ラジアル型モータのステータ鉄心において、外径側の部分で、巻線が巻かれない部分

※6 ティース

ラジアル型モータのステータ鉄心において、ロータ側に突出した部分をさし、この部分に巻線が巻かれる

※7 鉄損

磁性材料の鉄心（コア）にコイルを巻き、交流で磁化した時に失われる電気エネルギー

※8 ヒステリシス損

鉄心に交流磁界が印加される時に、鉄心の磁区が交番磁界によって磁界の向きを変えるときに生じる損失

※9 渦電流損

鉄心に交流磁界が印加される時に、鉄心の中に生じる渦電流によって生じる損失。高周波になるほど渦電流損の比率が大きくなる

※10 ヒステリシスループ

磁性体の磁化は、磁界を強くするときと弱くするときとは別のルートを辿り、特徴的なループを描くが、この曲線をさす

※11 透磁率

磁場（磁界）の強さ H と磁束密度 B との関係は $B = \mu H$ で表わした時の比例定数 μ

※12 保磁力

磁化された磁性体を磁化されていない状態に戻すために必要な反対向きの外部磁場の強さ

参考文献

- (1) 山本健一、霜村英二、山田一夫、佐々木堂、「電動機鉄心の磁気特性に及ぼす外部応力の影響」、電学論 A.1997.117号第3巻、p.311-316
- (2) 谷良浩、大穀晃裕、中野正嗣、有田秀哲、都出結花利、吉岡孝、山口信一、藤野千代、「応力下における電磁鋼板の磁気特性（その2）」、マグネティックス研究会資料 2004.MAG-04-91、p.59-64
- (3) 山本健一、岡崎靖雄、藤原耕二、谷良浩、「応力印加による電磁鋼板の磁気特性への影響」、マグネティックス研究会資料 2004.MAG-04-226、p.39-44
- (4) 堀紘二郎、金春峰、石原好之、戸高敏之、吉川浩平、「応力下における圧粉磁心の磁気特性」、マグネティックス研究会資料 2006.MAG-06-73、p.43-48
- (5) 榎本裕治、北村正司、茂木康彰、安藤隆司、落合誠、虻川俊美、「新締結方法を採用した外転型磁石モータの小型・高効率化」、電学論 D.2004.124号第6巻、p.529-535

執筆者

吉川 浩平*：自動車技術研究所 パワーエレクトロニクス研究部
山田 幸伯：自動車技術研究所 パワーエレクトロニクス研究部
山本伸一郎：自動車技術研究所 パワーエレクトロニクス研究部
餅田 恭志：自動車技術研究所 パワーエレクトロニクス研究部 主査
大橋 紳悟：自動車技術研究所 主席
福永 由加：解析技術研究センター 主席
澤井 孝典：自動車技術研究所長
藤原 耕二：同志社大学 理工学部 教授 博士（工学）
石原 好之：同志社大学 電磁エネルギー応用研究センター
センター長 教授（工学博士）

*主執筆者