

Research on application technology of non-oriented electrical steel sheet for motor core

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/48051

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博士学位論文要旨

論文題目：モータ用無方向性電磁鋼板の利用技術に関する研究
(英訳) Research on application technology of non-oriented electrical
steel sheet for motor core

所属：金沢大学大学院自然科学研究科機械科学専攻

氏名：藤村浩志

Summary

Application technology of non-oriented electrical steel sheet to reduce the core loss and to simultaneously enhance the torque for an electrical motor is important in order to improve efficiency of an electrical motor. The final goal of the present study is to contribute to realize the resource-saving and energy-saving society. This report evaluates the influences of core manufacturing process, such as interlocking, shrink-fitting, and stress-relief annealing, on magnetic properties of laminated ring cores, produced by automatic interlocking die. As results, core losses increase due to both the plastic deformation around the interlocking protuberances and the elastic stress caused by shrink-fitting. And then it was revealed that the eddy current losses of the annealed ring cores increased due to both the compressive stress in magnetizing direction and the electrically short-circuit between sheets in the interlocking parts. In addition, a new method was proposed in order to accurately estimate the amount of deterioration in the magnetic characteristics by stamping, while taken into account plastic deformation and elastic stress in a core. On the other hand, the torque characteristics of Interior-Permanent-Magnet Synchronous motor (IPMSM) was investigated using IPM motor simulator, in which both our conventional non-oriented electrical steel 35SX250 and our developed steels 35SXH with high permeability were tested as a core material. The torque characteristics of the motor with the developed steels were superior to that of the conventional steel. The advantage of the developed steels was remarkable in the high torque region. And then its characteristics of the motor were further improved by relieving stamping-stress in stator core. Therefore, it is concluded that the present study is valuable from both scientific and technological points of view for the development of high efficiency motor.

要旨：

無方向性電磁鋼板はモータや発電機などの鉄心材料であり，それらの機器の高効率化の研究開発は省エネルギー社会の構築に不可欠である。本研究では，モータ高効率化につながる無方向性電磁鋼板の利用技術，すなわちモータ鉄心の低鉄損化およびモータトルク性能向上，に関する課題に取り組んだ。具体的には，前記課題に対して積層鉄心の設計指針を導出することを目的として，無方向性電磁鋼板を用いたモータ積層鉄心の製造過程で広く採用されている“打抜き”，“かしめ”及び“焼き嵌め”を取り上げ，実際のモータ製造加工・組み立てを模擬した積層リングコアを作成し，その積層リングコアの磁気特性，主に加工による磁気特性劣化挙動を詳細に調査した。従来，鉄心製造時に導入される様々な歪により電磁鋼板の磁気特性が劣化することは知られていたが，本研究ではその複合効果について知見を得ることを目的とした。上記に加えて，本研究ではモデルモータ（IPM モータ）を作成し，そのトルク性能に及ぼす打抜き歪や無方向性電磁鋼板の磁気特性の影響を明らかにすることを目的とした。さらに，それらの実験的に得られた知見の数値解析やモデル化による考察を通じて，実験結果の妥当性の検証や無方向性電磁鋼板素材に立ち戻った現象の基礎的理解を深化させた。以下に，本研究論文の要旨をまとめる。

第1章では，まずモータ用鉄心材料の代表である無方向性電磁鋼板の開発課題や磁気特性について述べた。次に，モータ鉄心で発生する損失そのものに着目し，その損失の計測や数値解析による定量予測などの利用技術の従来知見と課題について整理した。その上で本研究の目的，本論文の構成について記述した。

第2章では，かしめの形状に着目し，その鉄損特性への影響を調査した。従来，モータ技術者においては，かしめの影響は他のかしめ間で形成される電流路や，鉄心内かしめと溶接やケースを通して形成される電流路によるものが中心であったが，本研究では単一かしめによる応力の影響と，単一かしめ内の電流路による影響について基礎的に検討した。その結果，丸平形状のかしめコアを歪取焼鈍すると顕著に渦電流損が増加することが判明した。そこで，かしめ部の短絡電流挙動を有限要素法（FEM）により数値解析し，実験結果と比較検討し，解析の妥当性を検証した。さらに，同解析を用いて，渦電流損に及ぼすかしめ形状の影響を定量的に明らかに

した。

第3章では、かしめを施した積層リングコアを用い、焼き嵌めや歪取焼鈍を組み合わせることによって、一般のモータ鉄心の使用環境を模擬した鉄心内の応力状態を再現し、積層リングコアの磁気特性を評価した。その結果、鉄損増加の要因として、打ち抜きやかしめによるものと焼き嵌めによるものがあるが、それらの要因間で相互作用があるため、各要因の鉄損増加代の単純和では鉄損増加を過大評価することを明らかにした。また、圧縮応力下での単板磁気特性と比較することにより、渦電流損の増加要因には圧縮応力とかしめ部の層間短絡があることを明らかにした。さらに、圧縮応力下の渦電流損増加の機構を磁区モデルで考察した。

第4章ではまず、塑性歪と残留応力が磁気特性に及ぼす、個別の影響度および複合的影響度の調査を行った。さらに、一枚の電磁鋼板から打抜き加工により作成した短冊状の一枚の板「打抜き加工単板」を対象として、打抜き加工時の変形解析により単板内の塑性歪と残留応力の分布を求め、上記調査結果を用いた電磁場解析によって単板の打抜き加工による磁気特性の劣化量の推定を試みた。これらの結果、両解析において弾性限を考慮することにより実際の劣化量を推測できることを確認し、打抜き加工による磁気特性劣化量の推定手法を確立した。打抜き加工における磁気特性劣化量の推定のためには、変形解析と電磁場解析において弾性限を考慮するとともに、残留応力の影響を考慮する必要があることを明らかにした。

第5章では、パルス幅変調インバータ制御（PWM 制御）により、高効率モータの代表である IPM モータのモデルモータ試験を行った。一般に、IPM モータのトルク性能は、永久磁石（性能、数量、配置など）やモータ形状を適正化するものが中心であったが、本研究では、ステータ鉄心の打抜き歪みや鉄心材料である無方向性電磁鋼板の磁気特性に着目し、トルク性能を調査した。その結果、歪取焼鈍を施したステータ鉄心を用いれば、トルク性能が向上することを明らかにした。さらに、高磁束密度を特徴とする無方向性電磁鋼板を用いた IPM モータのトルク性能は、汎用電磁鋼板よりも向上する事が明らかとなった。IPM モータのトルク性能が高ければモータの小型高出力化に繋がるとともに銅損低減によるモータ高効率化にも寄与する。

以上の本研究で得られた知見は、モータ鉄心設計や製造条件の改善に基本原理として活用されており、高性能モータ開発を加速できたと考える。さらに今後の展望としては、現在のモータ損失（鉄損と銅損の和）は、製造工程での塑性歪や弾性応力が無い理想状態の鉄心を基準におけば、10～30%程度余分に発生していると試算でき、無方向性電磁鋼板の磁気特性のさらなる向上とモータ利用技術のさらなる高度化により、モータ効率は将来にわたり向上していくものと確信する。そのためには、材料技術と利用技術が両輪となり、先端解析や計算科学を取り入れた研究開発を行い、原理原則から社会に貢献できる新しい材料開発や利用技術の提案の道筋が見出せるものと期待される。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

モータ用無方向性電磁鋼板の利用技術に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所属 機械科学 専攻

(2) 氏名 藤村 浩志

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、平成29年2月3日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に審査した。同日に口頭発表の後、第2回学位論文審査委員会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通りの判定をした。

本論文は、ハイブリッド自動車や電気自動車などのモータに用いられる無方向性電磁鋼板の利用技術に関するものである。その目的は、モータ鉄心の加工組み立て工程（鋼板の打ち抜き、積層体のかしめ、焼き嵌め）が磁気特性（鉄損（モータ効率）や磁束密度（トルク））に及ぼす影響を定量的に把握し、積層鉄心の設計指針を提示する点にある。電磁鋼板への圧縮の残留応力の付与はモータ効率を低下させるが、かしめと焼き嵌めが複合的に作用する場合には、その効果は単純加算より小さいことを明確化した。また、積層体の歪取焼鈍によりかしめ部の絶縁が劣化し鉄損が増加する現象を、かしめ形状の観点から調査し最適かしめ形状を提案した。さらに、打ち抜き加工による特性劣化の推定方法を、異分野の要素技術を利用して確立した。すなわち、打ち抜き加工時の変形解析と導入された残留応力の磁気特性への影響を考慮した電磁場解析を連成させるモデルを初めて構築し、特性の評価と向上に活用した。一方では、実際に磁石埋込型同期モータを試作し、トルク性能やエネルギー効率を総合的に評価する手法も確立した。

以上のように、本論文はモータ用無方向性電磁鋼板の利用技術に関して貴重な設計指針を与えるものであり、学術的にも工業的にも価値が高く、博士（工学）の学位に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印） 合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）