

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560328

研究課題名(和文)電気機器限界設計のための鉄芯材料最適化手法の研究

研究課題名(英文)Basic study of optimization method of iron-core material for limit design of electric machinery

研究代表者

松尾 哲司(Matsuo, Tetsuji)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20238976

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：鉄芯のマクロ特性を材料データから模擬する基礎的な物理モデルを開発した。鉄芯内の磁化過程を明らかにするために、機械的応力下・直流重畳下など各種条件での電磁鋼板磁気特性を測定し、巨視的特性が磁壁移動・磁化回転・ピンニングなど微視的磁化過程のモデル化によって説明できることを示した。結晶粒スケールモデルである単純化磁区構造モデルの集合として、巨視的な磁化過程の物理的モデルを構築した。全体磁気エネルギーの極小化により磁化過程が決定される。集合モデルにより、電磁鋼板の特性と定性的に一致する磁化曲線を得た。ベクトルヒステリシス特性を考慮した、実用的な計算時間での有限要素磁界解析手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：A basic macroscopic physical magnetization model is developed to simulate magnetic property of core material based on the material parameters.

To clarify the magnetization process in the core, properties of silicon steel were measured under mechanical stress and DC biased excitation. Measured properties reveal that the macroscopic property can be explained by modeling the microscopic magnetization process such as the domain-wall motion, magnetization rotation and pinning.

The macroscopic magnetization model is constructed by the assembly of simplified domain structure models (SDSMs), where the SDSM is a magnetization model of crystal-grain scale. The magnetization process is determined by local energy minimization. The magnetization property given by the assembled SDSMs agrees with measured property of silicon steel qualitatively. A finite element method for magnetic field analysis was developed, which describes rotational hysteretic field within practical computation time.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器工学 磁性 計算材料物理学 電磁鋼板 有限要素磁界解析

## 1. 研究開始当初の背景

電気自動車・ロボットなどのモータに対する、小型軽量化・高出力化・制御性能の高度化の要求は年々厳しくなっている。それと同時に、省エネルギーおよび CO2 排出量削減のため、電気機器全般には高効率化が求められている。このため、計算機シミュレーションによる最適設計手法を用いた電気機器の限界設計が行われるようになってきている。しかし、鉄芯材料データには既存の材料データが用いられるため、電気機器の性能は既存の鉄芯材料の特性に制約される。例えば、前述の要求を全て満たすモータを実現するためには、PWM 方式による広い駆動周波数範囲において高磁束密度領域でかつ低損失の特性を有することが必要で、既存の鉄芯材料の特性限界との相克が厳しい。

電磁鋼板の製造技術は成熟しているが、反面、鋼板の磁気特性は複雑であり、材料の基礎的な物性データから磁気特性を精度よく予測することは今まで困難であった。しかし、最近、材料物理学的な検討が進み、材料の組成・結晶粒径/方位・不純物(析出物)量などから基礎的な磁気特性が推定可能になってきている。他方で、磁性材料のベクトル磁気ヒステリシス特性のモデル化技術の開発により、詳細な鉄芯マクロ磁気特性の表現(以下、ベクトルヒステリシスモデル)が可能となり、それと同時に、マイクロ磁気学的検討による磁化特性解析(以下、磁区構造モデル)も可能になってきている。また、磁区構造モデルとベクトルヒステリシスモデルの両者を組み合わせたマルチスケール磁気特性モデルの構成が進められている。したがって、これらの材料解析技術を組み合わせることにより、基礎的な材料物性データから鉄芯材料の磁気特性を予測することが可能な状況になってきている。材料物性から磁気特性を予測することが可能になれば、逆に、電気機器の特性に必要な鉄芯材料を得るための材料物性を特定することが可能になり、鉄芯材料を最適化することも可能になると考えられる。

## 2. 研究の目的

電気機器限界設計のために鉄芯材料を最適化する手法の開発を目指した基礎研究を下記のように行う。まず、鉄芯材料の物性データから鉄芯の特性を予測・模擬する基礎的な手法を開発し、それを用いた、電気機器の有限要素磁界解析法を開発する。

(1) 材料データと磁区構造モデルの間の対応関係を明らかにする。まず、材料データから、磁区構造モデルにおける、磁気異方性およびピンニングポテンシャルを表現する手法を開発する。次に、電磁鋼板の結晶方位分布を用いて磁区構造モデルの集合を構成する手法を開発する。

(2) (1)の手法と、同時に開発したマルチス

ケール磁気特性モデルとを組み合わせることにより、電気機器の磁界シミュレーションに必要な鉄芯材料のマクロ磁気特性を、基礎的な材料物性データから予測・模擬する基礎的な手法を開発する。

(3) 材料物性と電気機器詳細形状の双方を考慮して機器特性を模擬するための、有限要素磁界解析の定式化手法を開発する。材料データの大部分は(1)の磁区構造モデルにより表現されるが、一部は有限要素法における材料パラメータとして表現される。そのモデル化手法の最適な組み合わせ法を検討し、有限要素定式化を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 磁区構造モデルとその集合を用いた、鉄芯材料の物理モデルの開発

磁区構造モデルを用いて、鉄芯材料の磁気特性を表現する物理モデルを開発する。結晶粒が示す磁気特性を磁区構造モデルで表現し、その集合としてマクロ磁気特性を表現する。方向性電磁鋼板は結晶方位が揃っているため、磁区構造モデルによるモデル化に適している。そこで、既存の方向性電磁鋼板について、立方磁気異方性を仮定した磁区構造モデルによる磁気特性表現と鋼板の実測特性とを比較検討する。無方向性電磁鋼板は結晶方位に分布を有するため、結晶方位分布を持つ磁区構造モデルの集合により磁気特性を表現する。

(2) 有限要素磁界解析のためのモデル化手法の検討

材料物性モデルにて考慮される物性データのうち、磁区構造モデルに表現されないものについて、有限要素磁界解析に組み込む手法を開発する。異常渦電流損を含む渦電流の効果のモデル化が中心となる。また、材料物性を反映したマクロ磁気特性モデルによる有限要素磁界解析法を開発する。

(3) 各種励磁条件における鉄芯特性測定

モデル検証と磁化過程の理解のため、各種励磁条件における電磁鋼板の特性を計測する。機械的応力下での磁気特性や、直流重畳時のマイナーヒステリシスループを計測することにより、磁区構造の変化が磁化過程に及ぼす影響を明らかにする。また、実際のモータ駆動には PWM 方式が用いられることが多いため、PWM 入力条件で無方向性電磁鋼板の特性を計測する。

## 4. 研究成果

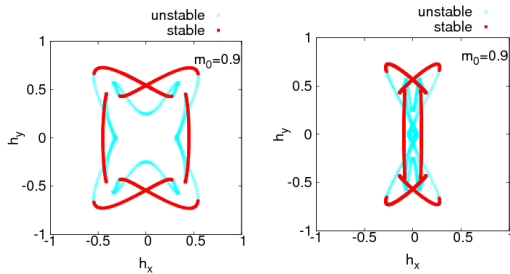
(1) 磁区構造モデルを用いた、鉄芯材料の物理モデルの開発

電磁鋼板の結晶粒が示す磁気特性を表現するため、立方磁気異方性を仮定した磁区構造モデルを構成した。方向性電磁鋼板の圧延方向および直角方向の交番磁気特性の計算結果は、測定結果と定性的に一致した。また、回転磁化条件下での計算結果は、方向性電磁鋼板および無方向性電磁鋼板の測定結果と

定性的によく一致した(図1)。すなわち、単独の磁区構造モデルは電磁鋼板の基本的な磁気特性を表現できることが示された。

複数のエネルギー極小解が存在する場合に、実現する磁化状態を磁化の履歴に依存して決定する状態依存磁区構造モデルを開発した。単純化磁区構造モデルにピンニング磁界を導入し、ピンニング型ヒステリシスの表現を可能にした。

単純化磁区構造モデルを基本セルとしてその集合により鉄芯材料のマクロ磁気特性を表現する集合磁区モデル(図2)を開発し、材料内の減磁界分布を考慮した電磁鋼板のマクロ磁気特性を定性的に表現することを可能にした。高速フーリエ変換を用いた減磁界計算の高速化手法を開発した。高速化モデルを用いて、数百から数千のセルを用いて方向性電磁鋼板の磁化過程シミュレーションを行い、圧延方向については異方性磁界より小さい保磁力を持つ角形ヒステリシス特性を持つこと、直角方向については磁区構造の変化により段階的な磁化特性を持つことなど、磁気特性を再現することが可能になった(図3)。



(a) 形状異方性なし (b) 形状異方性あり  
図1 回転磁束下の磁界ベクトル軌跡

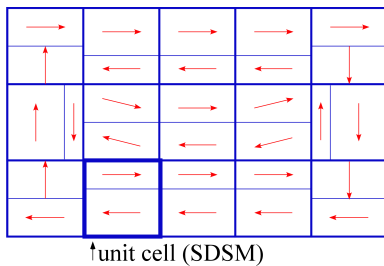


図2 単純化磁区構造モデル(SDSM)の集合によるマクロ磁化特性の表現

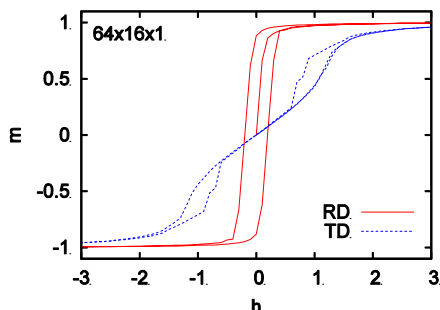
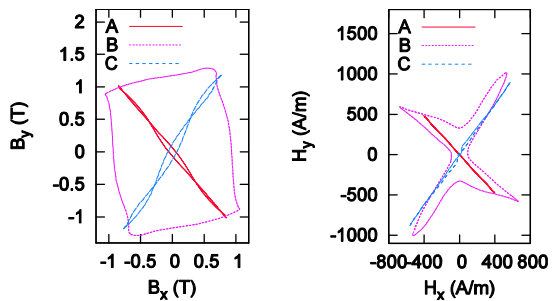


図3 方向性電磁鋼板の磁化曲線の模擬

## (2) 有限要素磁界解析のためのモデル化手法の検討

異常渦電流損を含む渦電流の効果について、鋼板厚み方向1次元有限要素法によるモデル化手法を検討した。BH曲線およびアノマリーファクターの鋼板厚み方向の非一様性が、鋼板の磁気特性に及ぼす影響を明らかにした。また、アノマリーファクターの動的モデルを提案し、同モデルを導入した有限要素解析により、電磁鋼板の交流ヒステリシス特性を精度よく表現できることを示した。

他方で、ベクトルヒステリシス特性を考慮した2次元有限要素磁界解析手法を開発した。プレモデルにて表現される異方性ベクトルヒステリシス関数の微分計算法を開発し、有限要素磁界解析コードに実装した。鉄芯コイルの磁界解析ではニュートン法の実用的な収束特性を得た。三相インダクタのT字型接合部に生じる回転磁束下のベクトルヒステリシス挙動の解析が可能になった(図4)。計算時間はヒステリシスを無視した解析の数倍程度であり、実用的な範囲に収まっている。



(a) 磁束密度ベクトル軌跡 (b) 磁界ベクトル軌跡

図4 3相インダクタに生じる回転磁界

## (3) 磁化過程のモデル化手法の検討

下記のように各種励磁条件下における鉄芯磁気特性を計測した。1. 材料物性におよぼす要因を明らかにするため、応力下における電磁鋼板の磁気特性を測定した。2. PWM励磁下における電磁鋼板の磁気特性測定を行った。3. 方向性電磁鋼板の磁気異方性を利用したリラクタンストルクを評価するための磁気計測を行った。4. 直流重畳下でのマイナーループを測定した。その測定結果の検討により、以下のような磁化過程のモデル化手法を得た。

磁化曲線表現の磁区モデル化の検討により、低磁束密度ではレイリループでモデリングすることで2定数で磁化曲線が表現でき(図5)、中磁束密度では結晶粒界のピンニングと磁壁移動で表現できることを示した。さらに、応力依存性は、磁壁移動と磁化回転を考慮すれば、磁歪現象として説明できモデリング可能であること、また、歪(塑性変形)依存性は、結晶粒界の残留応力で概略説明で

きることを示した(図6)。

方向性電磁鋼板の直角方向磁気特性に関して磁壁移動と磁歪挙動に基づいて検討し、低磁束密度では、圧延方向の180度磁壁移動により説明できること、中磁束密度では圧延方向から直角方向への90度磁壁移動による段階的な磁化特性が表面張力の影響で説明できることなどが示され、磁区挙動により特性をモデリングすることの有効性が示された。

直流重畳下におけるマイナーループ特性のモデル化手法を検討した。初磁化曲線、下降曲線、上昇曲線上に始点を持つマイナーループを測定し、レイリーループのパラメータ(初期比透磁率、レイリー定数)を求めた。マイナーループの直流重畳特性には結晶粒径や磁化過程の遷移の影響が現れ、モデルパラメータの変化として反映されることが示され、モデル化手法の有効性が示された。

電磁鋼板の磁気特性は表面磁極や結晶粒分布の影響を受けるため内部で均一でなく、鋼板内部の磁束分布も一様にならないと考えられる。鋼板内部の磁気特性分布を等価回路で表現し、各種電磁鋼板の測定結果から回路定数を求めることにより、磁気特性の分布を定量的に明らかにした。

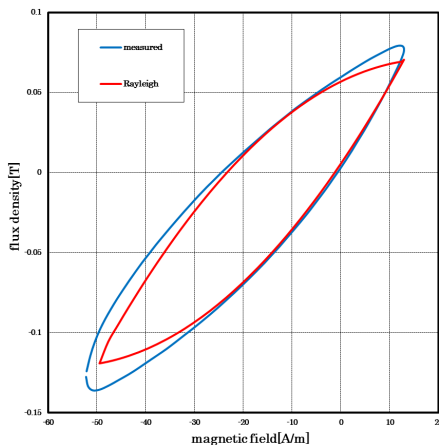


図5 レイリーループによるモデリング

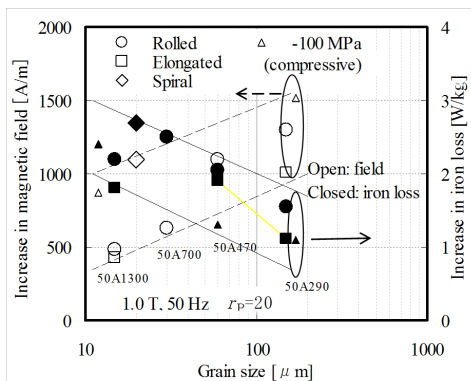


図6 励磁力増加と鉄損増加の結晶粒径依存性(塑性変形による励磁力増加の結晶粒径依存性が、圧縮力(弾性変形)による場合と同様の挙動を示している)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6件)

1. 開道力, 無方向性電磁鋼板における磁化曲線モデリングの検討, 電学論 A, Vol. 131, pp. 466-471, 2011.  
doi: 10.1541/ieejfms.131.466
2. T. Matsuo, M. Miyamoto, Dynamic and Anisotropic Vector Hysteresis Model Based on Isotropic Vector Play Model for Non-Oriented Silicon Steel Sheet, IEEE Trans. Magn., Vol. 48, No. 2, pp. 215-218, 2012.  
doi: 10.1109/TMAG.2011.2173751
3. M. Sudo, T. Matsuo, Magnetization Modeling of Silicon Steel Using a Simplified Domain Structure Model, J. Appl. Phys., Vol. 111, Issue 7, 07D107, 2012.  
doi: 10.1063/1.3672073
4. R. Mitsuoka, T. Mifune, T. Matsuo, Dynamic Hysteresis Modeling of Silicon Steel Having Nonuniform Magnetic Property, J. Appl. Phys., Vol. 111, Issue 7, 07D110, 2012.  
doi: 10.1063/1.3672864
5. R. Mitsuoka, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, A Vector Play Model for Finite-Element Magnetic-Field Analysis with Newton-Raphson Method, IEEE Trans. Magn., Vol. 49, No. 5, pp. 1689-1692, 2013.  
doi: 10.1109/TMAG.2013.2244076
6. M. Sudo, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, A Simplified Domain Structure Model Exhibiting Pinning Field, IEEE Trans. Magn., Vol. 49, No. 5, pp. 1829-1832, 2013.  
doi: 10.1109/TMAG.2013.2245313

[学会発表](計 22件)

1. 須藤正人, 松尾哲司, 単純化磁区構造モデルによる電磁鋼板磁化過程表現に関する予備的検討, 電学マグネティクス研資 MAG-11-026, 2011.
2. 高原英実, 開道力, 無方向性電磁鋼板磁気特性の応力依存性における磁化機構の検討, 電学マグネティクス研資 MAG-11-29, 2011.
3. 高原英実, 開道力, 無方向性電磁鋼板磁気特性の応力依存性における磁化機構の検討, 平 23 電学基礎・材料・共通部門大, -5, pp.135-140, 2011.
4. 開道力, 新井聡, 塑性変形による鉄心性能劣化, 平 23 電学基礎・材料・共通部門大会, -6, pp.140-146, 2011.
5. 光岡隆平, 美舩健, 松尾哲司, プレイモデルと有限要素渦電流解析を用いた電磁鋼板の交流ベクトルヒステリシスモデルの検討, 電学静止器・回転機合同研資

- SA-11-069/RM-11-082, 2011.
6. 開道力, 高原英実, 李燦, 宮田健治, 電磁鋼板磁気特性における応力歪モデル, 電学静止器・回転機合同研資 SA-11-65/RM-11-78, 2011.
  7. R. Mitsuoka, T. Mifune, T. Matsuo, Dynamic Hysteresis Modeling of Silicon Steel Having Nonuniform Magnetic Property, 56th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Scottsdale, USA, GP-03, 2011.
  8. M. Sudo, T. Matsuo, Magnetization Process Modeling for Silicon Steel Using Simplified Domain-Structure Model, 56th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Scottsdale, USA, GP-15, 2011.
  9. 須藤正人, 松尾哲司, 単純化磁区構造モデルによる電磁鋼板磁化過程表現に関する検討, 電学マグネティックス研資 MAG-11-118, 2011.
  10. 開道力, 電磁鋼板の磁気特性への結晶粒界依存性モデル, 電学マグネティックス研資 MAG-11-138, 2011.
  11. 光岡隆平, 美舩健, 松尾哲司, プレイモデルと有限要素渦電流解析を用いた電磁鋼板の交流ベクトルヒステリシスモデルの検討(その2), 電学静止器・回転機合同研資 SA-12-017/RM-12-017, 2012.
  12. 光岡隆平, 美舩健, 松尾哲司, 開道力, ベクトルプレイモデルの微分計算と有限要素磁界解析への応用に関する検討, 電学静止器・回転機合同研資 SA-12-100/RM-12-115, 2012.
  13. 開道力, 宮田健治, 李燦, 松尾哲司, 美舩健, 方向性電磁鋼板鉄心によるリラクタンストルク発生モデル, 電学静止器・回転機合同研資 SA-12-105/RM-12-120, 2012.
  14. 須藤正人, 美舩健, 松尾哲司, 開道力, ピンニングを考慮した単純化磁区構造モデルに関する検討, 平 24 電学基礎・材料・共通部門大会, P-11, 2012.
  15. M. Sudo, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, A Simplified Domain Structure Model Exhibiting Pinning Field, 15th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Oita, Japan, MP2-17, p. 42, 2012.
  16. R. Mitsuoka, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, A Vector Play Model for Finite-Element Magnetic-Field Analysis with Newton-Raphson Method, 15th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Oita, Japan, TP2-15, p. 212, 2012.
  17. 開道力, 松尾哲司, 美舩健, 李燦, 宮田健治, 方向性電磁鋼板のTD磁気特性における磁区モデル, 電学静止器・回転機合同研資 SA-13-007/RM-13-007, 2013.
  18. 開道力, 松尾哲司, 美舩健, 宮田健治, 李燦, 磁区モデルによる方向性電磁鋼板鉄心の性能算定, 電学マグネティックス研資 MAG-13-015, 2013.
  19. 中西竜也, 開道力, 宮田健治, 李燦, 松尾哲司, 電磁鋼板におけるマイナーループ簡易モデルの高精度化, 電学静止器・回転機合同研資 SA-13-073/RM-13-087, 2013.
  20. T. Matsuo, C. Kaido, Macroscopic Magnetization Modeling Using Assembly of Simplified Domain Structure models, 21th Soft Magnetic Materials Conference, Budapest, Hungary, B2-07, 2013.
  21. 松尾哲司, 伊藤俊平, 開道力, 単純化磁区構造モデルの集合によるマクロ磁化過程解析に関する検討, 電学マグネティックス研資 MAG-13-142, 2013.
  22. 開道力, 李燦, 宮田健治, 松尾哲司, 美舩健, 中西竜也, 電磁鋼板内特性分布を考慮した磁気特性モデル, 電学静止器・回転機合同研資 SA-14-007/RM-14-007, 2014.
- [図書](計 0件)
- [産業財産権]  
出願状況(計 0件)
- [その他]
6. 研究組織
- (1)研究代表者  
松尾 哲司 (MATSUO, Tetsuji)
- 研究者番号: 20238976
- (2)研究分担者  
美舩 健 (MIFUNE, Takeshi)
- 研究者番号: 20362460
- (3)連携研究者  
開道 力 (KAIDO, Chikara)
- 研究者番号: 20373558