

平成22年 5月28日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007 ～ 2009
 課題番号：19560288
 研究課題名（和文） 積層鉄心の均質化ベクトル磁気特性モデルを用いた
 電気機器の高効率高精度電磁界解析
 研究課題名（英文） Efficient and Accurate Electromagnetic Field Analysis for Electric
 Machines Using Homogenized Vector Magnetic Hysteresis Model of Laminated Iron-Cores
 研究代表者
 松尾 哲司（MATSUO TETSUJI）
 京都大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：20238976

研究成果の概要（和文）：電磁鋼板の磁気特性表現のために、高精度な等方性および異方性ベクトルヒステリシスモデルを開発した。その手法および積層鉄心の均質化手法を用いた効率的な電磁界解析手法を開発した。磁区構造モデルを改良し、中間スケールの磁化過程の記述を可能にした。周期境界条件を仮定したマイクロ磁気学シミュレーション手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：Accurate isotropic and anisotropic vector hysteresis models have been developed to represent magnetic properties of silicon steel sheets. Efficient methods for electromagnetic field analysis have been developed using the hysteresis model above and homogenization technique for laminated iron-cores. A domain structure model was improved to describe mesoscopic magnetization process. A method for micromagnetic simulation has been developed under periodic boundary condition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：電気機器工学，ベクトルヒステリシス，マルチスケールモデル，電磁鋼板，マイクロ磁気学

1. 研究開始当初の背景

現代社会の電力消費の約半分がモーターによるものであり、そのため、電力損失の大きな部分をモーターに生じる鉄損が占めている。また今後、環境負荷が小さい電気自動車の普及が予想されることから、モーターの更なる高効率化・小型軽量化・高出力化が必

要とされている。一方、計算機および解析手法の進歩により、モーターなど電気機器の開発には計算機による電磁界解析が不可欠となっている。しかし、電気機器の鉄芯材料である電磁鋼板は、(1) ベクトルヒステリシス特性を持つこと、および、(2) 積層して用いられることから、これらを考慮した電気機器

の電磁界解析は容易でない。このことが、電気機器の電磁界解析（特に損失解析）の高精度化の妨げとなっていた。

2. 研究の目的

そこで本研究では、電磁鋼板の均質化ベクトル磁気特性モデルを用いて、電気機器の効率的で正確な電磁界解析手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 電磁鋼板のベクトルヒステリシス特性計測、

および、

(2) ベクトルヒステリシスモデルの開発を行い、本課題の目的である、

(3) 均質化ベクトル磁気特性モデルを用いた電磁界解析手法の開発

を進めた。また、上記モデル化手法の物理的な裏付けとして、さらには、モデル化手法の高度化のための次のステップとして、

(4) マルチスケール磁気特性モデルの開発に取り組んだ。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を、上記の研究の方法(1)～(4)に大別して以下にまとめる。

(1) 電磁鋼板のベクトルヒステリシス特性計測

均質化ベクトル磁気特性モデルは、直流 2 次元ベクトルヒステリシスモデルと、均質化法による動的モデルの和で与えられる。前者のモデル化のため、直流に近い低周波領域における各種無方向性電磁鋼板のベクトルヒステリシス特性計測を行った^{[8](23)}。また、後者のモデル化のため、可聴周波数領域における電磁鋼板のベクトルヒステリシス特性を計測した。計測装置における磁気シールドと 2H コイル法の効果を検証し、磁気シールドにより 2H コイル法と同等の精度が得られることを示した。また、楕円回転磁束条件におけるベクトルヒステリシス特性の計測を行った⁽⁵⁾⁽⁸⁾。

(2) ベクトルヒステリシスモデルの開発

弱異方性ベクトルヒステリシスモデル(直流モデル)のベースとなる等方性モデルの計算効率と表現精度の改善のため、ベクトルプレイヒステロンおよびベクトルストップヒステロンを用いたヒステリシスモデルを導入した^{[6](14)(15)(19)(26)}。重み関数を用いて回転ヒステリシス損を実測値と一致させる手法を開発した。

次に、プレイヒステロンおよびストップヒステロンのベクトル化手法を改良し、それに基づく自然なベクトルヒステリシスモデル

を開発した^{[4](16)}。等方性ベクトルヒステリシスモデルの改良により、反復手法を用いることなく、回転ヒステリシス損を実測値と一致させることが可能になった(図1)^{[1](2)(7)(14)(15)}。

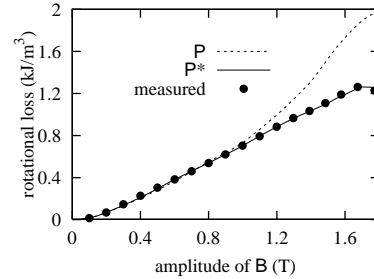


図1 修正ベクトルモデル(P^*)による回転ヒステリシス損のシミュレーション結果

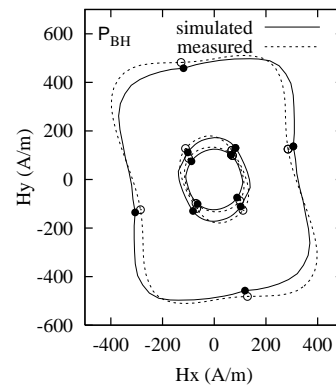


図2 回転磁束に対する磁界ベクトル軌跡のシミュレーション結果

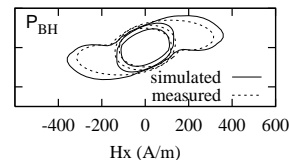


図3 楕円回転磁束に対する磁界ベクトル軌跡のシミュレーション結果

上記の等方性ベクトルヒステリシスモデルに異方性を表す行列を乗じることにより異方性を表現する簡潔なベクトルヒステリシスモデルを開発した^{[1](2)}。回転磁束(図2)および楕円回転磁束(図3)に対する無方向性電磁鋼板の磁界ベクトルの挙動を精度よく再現できることを示した。

(3) 均質化ベクトル磁気特性モデルを用いた電磁界解析手法の開発

均質化交流磁気特性モデルを、有限要素法を用いた2次元電磁界解析手法に組み込み、積層された鋼板1枚毎の格子分割を回避した効率的な解析手法を実現した⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽²⁰⁾。

さらに、電磁鋼板の厚み方向の磁束密度分布を区分一定近似⁽⁹⁾することにより、交流磁束印加時の磁界ベクトルを算出する簡潔な均質化交流ベクトルヒステリシスモデルを開発した⁽³⁾。また、有限要素法に対する本手法の等価性と優位性を示した。

(4) マルチスケール磁気特性モデルの開発

マルチスケール磁気特性モデルのキーとなる構成要素である中間スケール磁気特性モデルとして、磁区構造モデルの改良を行い、磁化過程の表現精度を改善した^{[5] (24) (25)}。

次に、単純化磁区構造モデルを開発した^{(13) (21)}。各磁気エネルギー成分を規格化して汎用性を高めた。エネルギーが極値を取る磁化状態をほぼ全て求めることにより、基本的な磁化機構を明らかにした。2 磁区からなる単純なモデルにより、実際の磁性体に見られるような、180° 磁壁移動から磁化回転に移行する磁化過程を再現できることを示した。単純化磁区構造モデルでは、得られる磁化特性の詳細な検討が可能となる。180° 磁壁移動の磁化過程および単磁区状態が現れる条件を解析的に導出し、異方性、減磁界、磁壁エネルギーが磁化特性に及ぼす影響を明らかにした⁽¹¹⁾。形状異方性を表現する単純化磁区構造モデルを開発し、不連続なインピーダンス変化を示す磁性薄膜素子の磁化過程を明らかにした⁽⁶⁾。

さらに、新たな有用な中間スケールモデルとして、周期構造を仮定したマイクロ磁気学シミュレーションにより小領域の解析によりマクロ磁気特性を求める手法を開発するとともに、周期境界マイクロ磁気学シミュレーションにより得られる磁化特性の検討を行った。3 次元周期磁化構造時の静磁界の収束特性を明らかにした^{(1) (4)}。周期条件により静磁界の影響が大きくなることを示し、大域的減磁界係数を定義することにより、線形磁化特性が得られる場合の磁化率、角型ヒステリシス特性が得られる場合のヒステリシス幅を説明できることを示した^{(1) (4)}。また、磁壁ピンニングによるヒステリシス特性のシミュレーションを行った^{(10) (12)}。

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 9 件)

- [1] T. Matsuo, “An Anisotropic Vector Hysteresis Model Using Isotropic Vector Play Model,” 査読有, *IEEE Trans. Magn.* (to appear)..
- [2] T. Matsuo, “Comparison of Rotational Hysteretic Properties of Isotropic Vector Stop Models,” 査読有, *IEEE*

Trans. Magn., Vol. 45, No. 3, pp. 1194-1197, March 2009.

- [3] 長野哲志, 松尾哲司, 島崎眞昭, “電磁鋼板の表皮効果を考慮した交流磁気特性モデル化手法の検討”, 査読有, 電学論 B, Vol. 129-B, No. 3, pp. 421-427, 2009.
- [4] T. Matsuo, “Rotational Saturation Properties of Isotropic Vector Hysteresis Models Using Vectorized Stop and Play Hysteresis,” 査読有, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 44, No. 11, pp. 3185-3188, Nov. 2008.
- [5] T. Matsuo, N. Mimuro and M. Shimasaki, “A Micromagnetic Study of Domain Structure Modeling,” 査読有, *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 320, Issue 20, pp. e1029-e1033, Oct. 2008.
- [6] T. Matsuo and M. Shimasaki, “Two Types of Isotropic Vector Play Models and Their Rotational Hysteresis Losses,” 査読有, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 44, No. 6, pp. 898-901, June 2008.
- [7] T. Matsuo and M. Shimasaki, “Identification of a Generalized 3-D Vector Hysteresis Model through the Superposition of Stop- and Play-Based Scalar Models,” 査読有, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 43, No. 6, pp. 2965-2967, June 2007.
- [8] T. Matsuo, H. Hirao and M. Shimasaki, “Preliminary Study of 2-Dimensional Magnetic-Property Measurement of Silicon Steel Sheet Using Stator of Induction Motor,” 査読有, *Przeglad Elektrotechniczny*, Vol. 83, No. 4, pp. 67-69, April 2007.
- [9] T. Matsuo and M. Shimasaki, “Generalization of an Isotropic Vector Hysteresis Model Represented by the Superposition of Stop Models – Identification and Rotational Hysteresis Loss –,” 査読有, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 43, No. 4, pp. 1389-1392, April 2007.

[学会発表] (計 26 件)

- (1) T. Matsuo and Y. Yamazaki, “Demagnetizing Field in Micromagnetic Simulation under Periodic Boundary Condition,” 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC Chicago), 501, 2010 年 5 月 11 日, アメリカ合衆国・ローズモント.
- (2) 松尾哲司, 宮本政樹, “等方性ベクトルプレイモデルを用いた異方性ベクトルヒステリシス特性表現に関する検討”, 平

- 22 電気学会全国大会 5-129, 2010 年 3 月 17 日, 明治大学.
- (3) 松尾哲司, 美船健, “区分一定近似を用いた均質化法による電磁鋼板の渦電流解析に関する検討(その 2)”, 電気学会マグネティックス・静止器・回転機合同研究会 MAG-10-026/ SA-10-026/RM-10-026, 2010 年 1 月 29 日, 豊田中央研究所.
- (4) 松尾哲司, 山崎由也, 岩下武史, “周期境界マイクロ磁気学シミュレーションにおける減磁界に関する検討”, 電気学会マグネティックス・静止器・回転機合同研究会 MAG-10-017 / SA-10-017 / RM-10-017, 2010 年 1 月 28 日, 豊田中央研究所.
- (5) 宮本政樹, 松尾哲司, “楕円回転磁束に対する電磁鋼板のベクトルヒステリシス特性とそのシミュレーション”, 電気学会マグネティックス研究会 MAG-09-231, 2009 年 12 月 21 日, 琉球大学.
- (6) 松尾哲司, “形状異方性を考慮した単純化磁区構造モデルによる磁化過程表現に関する検討”, 電気学会マグネティックス研究会 MAG-09-214, 2009 年 12 月 17 日, 東北大学.
- (7) T. Matsuo, “An Anisotropic Vector Hysteresis Model Using Isotropic Vector Play Model,” 17th Conference on Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG Florianopolis), PC1, 2009 年 11 月 25 日, ブラジル・フロリアノポリス.
- (8) 宮本政樹, 金田久司, 松尾哲司, “電磁鋼板の楕円回転ヒステリシス特性に関する検討”, 平 21 関西支部連合大会 G6-16, 2009 年 11 月 7 日, 大阪大学.
- (9) 松尾哲司, 美船健, “区分一定近似を用いた均質化法による電磁鋼板の渦電流解析に関する検討”, 電気学会静止器・回転機合同研究会 SA-09-66/RM-09-72, 2009 年 9 月 16 日, 北見工業大学.
- (10) T. Matsuo and Y. Yamazaki, “A Micromagnetic Simulation Assuming Periodic Domain Structure,” 19th Soft Magnetic Materials Conference (SMM Torino), B1-07, 2009 年 9 月 7 日, UK・カーディフ.
- (11) 松尾哲司, 高田琢平, “単純化磁区構造モデルによる磁化過程シミュレーションに関する検討(その 2)”, 電気学会マグネティックス研究会 MAG-09-53, 2009 年 7 月 16 日, 金沢工業大学.
- (12) 山崎由也, 松尾哲司, “周期構造を仮定した磁化過程のマイクロ磁気学シミュレーションに関する検討”, 電気学会マグネティックス研究会 MAG-08-186, 2008 年 12 月 12 日, 宮崎大学.
- (13) 高田琢平, 松尾哲司, “単純化磁区構造モデルによる磁化過程シミュレーションに関する検討”, 電気学会マグネティックス研究会 MAG-08-175, 2008 年 12 月 11 日, 宮崎大学.
- (14) 松尾哲司, 金田久司, “ベクトルストップヒステロンを用いた等方性ヒステリシスモデルに関する検討”, 電気学会マグネティックス研究会 MAG-08-73, 2008 年 6 月 5 日, 豊田中央研究所.
- (15) T. Matsuo, “Comparison of Rotational Hysteretic Properties of Isotropic Vector Stop Models,” 13th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC Athens), PB3-15, pp. 132, 2008 年 5 月 12 日, ギリシャ・アテネ.
- (16) T. Matsuo, “Rotational Saturation Properties of Isotropic Vector Hysteresis Models Using Vectorized Stop and Play Hysteros,” 2008 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG Madrid), GG-02, p. 1137, 2008 年 5 月 8 日, スペイン・マドリッド.
- (17) 長野哲志, 松尾哲司, 美船健, 島崎眞昭, “均質化法を用いた積層鉄心のヒステリシス渦電流解析に関する検討”, 平 20 電気学会全国大会 5-188, 2008 年 3 月 20 日, 福岡工業大学.
- (18) 長野哲志, 松尾哲司, 美船健, 島崎眞昭, “均質化法を用いた積層電磁鋼板のヒステリシス渦電流解析に関する予備的検討”, 電気学会マグネティックス・静止器・回転機合同研究会 MAG-08-28/ SA-08-16/RM-08-16, 2008 年 1 月 25 日, 同志社大学.
- (19) 松尾哲司, 金田久司, 島崎眞昭, “等方性ベクトルプレイモデルによる回転ヒステリシス特性表現に関する検討”, 電気学会マグネティックス研究会 MAG-07-142, 2007 年 12 月 18 日, 別府市.
- (20) 長野哲志, 松尾哲司, 島崎眞昭, “均質化法を用いた積層電磁鋼板の有限要素渦電流解析に関する一検討”, 平 19 関西支部連合大会 G4-12, 2007 年 11 月 17 日, 神戸大学.
- (21) 高田琢平, 松尾哲司, 島崎眞昭, “単純化磁区構造モデルによる磁性体薄膜の磁化過程表現に関する検討”, 平 19 関西支部連合大会 G1-12, 2007 年 11 月 17 日, 神戸大学.
- (22) 後藤大輔, 松尾哲司, 島崎眞昭, “FMM を用いたマイクロマグネティックスシミュレーションの高速化に関する一検討”, 平 19 関西支部連合大会 G1-10, 2007 年 11 月 17 日, 神戸大学.
- (23) 金田久司, 平尾啓, 松尾哲司, 島崎眞昭, “誘導機固定子を用いた単板磁気試

験器による電磁鋼板 2 次元磁気特性計測に関する検討”，平 19 関西支部連合大会 G1-11, 2007 年 11 月 17 日, 神戸大学.

- (24) T. Matsuo, N. Mimuro and M. Shimasaki, “A Micromagnetic Study of Domain-Structure Modeling,” 18th Soft Magnetic Materials Conference (SMM Cardiff), Book of Abstracts, J-020, pp. 121, 2007 年 9 月 3 日, UK・カーディフ.
- (25) 松尾哲司, 三室直紀, 島崎眞昭, “磁区構造モデルによる磁化過程シミュレーションに関する検討”, 電気学会マグネティックス研究会, MAG-07-55, 2007 年 7 月 17 日, 松下電器産業・松心会館.
- (26) T. Matsuo and M. Shimasaki, “Several Isotropic Vector Play Models and Their Rotational Hysteresis Losses,” 16th Conference on Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG Archen), PA3-6, pp. 105-106, 2007 年 6 月 25 日, ドイツ・アーヘン.

[その他]

ホームページ等

<http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 哲司 (MATSUO TETSUJI)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20238976

(2) 研究分担者

岩下 武史 (IWASHITA TAKESHI)

京都大学・学術情報メディアセンター・准教授

研究者番号：30324685

美船 健 (MIFUNE TAKESHI)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20362460

(3) 連携研究者

なし