

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06300

研究課題名（和文）電気機器鉄芯材料の応力依存ベクトル磁気特性の物理的/現象論的モデル化手法の開発

研究課題名（英文）Development of physical and phenomenological models of stress-dependent vector magnetic properties of core materials for electric machines

研究代表者

松尾 哲司 (Matsuo, Tetsuji)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：20238976

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：[1. 応力依存ベクトル磁気特性計測手法の開発] 円盤試料を用いたベクトル磁気特性計測において、円盤試料に圧電フィルムを接着し、圧縮応力を印加する機構を追加した。
[2. 磁区モデルの改良] 集合磁区モデルにおける静磁界計算を簡略化する手法を開発し、応力依存性の予測精度を損なうことなく計算時間を1/5程度に短縮した。ベクトルプレイモデルの同定法を利用して、磁区モデルに用いるピンニング磁界分布を、無応力時の磁気測定結果から直接算定することを可能にした。
[3. 等価応力モデルの検討] 一方向の応力依存磁気特性の測定結果から、任意方向の磁気特性の応力依存性を予測する等価応力モデルを比較検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

応力下の磁気計測と物理的モデルによるシミュレーションにより、磁化と応力の方向が異なる場合の磁化特性の応力依存性を明らかにするとともに、その結果を用いて、応力依存性を簡潔に表現するためのベクトル等価応力モデルを開発した。この技術を用いて、応力下での計測をすることなく、あるいは最小限の計測に基づき、応力・磁界連成解析を行うことが可能になり、モータ製造時の特性劣化とその要因を評価することが可能になった。

研究成果の概要（英文）：[1. Development of measuring technique of stress-dependent vector magnetic property] A pair of piezoelectric films is attached to a circular sample of silicon steel sheet in the rotational single sheet tester, wherein the film shrinks to exert compressive stress on the sheet.

[2. Improvements of domain model] The magnetostatic computation is simplified for a fast magnetization analysis under mechanical stress without loss of prediction accuracy. Using the identification method of vector play model, the pinning-field distribution in the domain model is identified from measured BH loops under the stress-free condition.

[3. Study of equivalent stress theory] Equivalent stress models are numerically tested to predict the stress-dependent magnetic property from a unidirectional measurement.

研究分野：計算磁気学

キーワード：電気機器工学 電子・電気材料 シミュレーション工学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

機器設計のための鉄芯材料モデル化 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・高効率化の要求は年々厳しくなっている。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モータの限界設計が行われている。モータ性能は電磁鋼板などの鉄芯材料の磁気特性に制限されるので、これまで磁気特性の高精度なモデル化手法の開発が進められてきた。例えば、申請者らが開発したヒステリシスモデル等により、鉄芯材料の静的・動的なベクトルヒステリシス特性が高精度に表現され、電磁界解析に活用されている。

鉄芯材料の応力特性 近年、機械的応力の影響の重要性が明らかになり、焼嵌めなど機器製造工程で鉄芯に加わる応力が磁気特性を大きく劣化させることが問題となっている。そこで、鉄芯材料の応力下での磁気特性測定が進められている。しかし、これまで応力特性の有効なモデル化手法が確立されていなかったため、鉄芯のベクトル磁気特性の応力依存性の表現には膨大な計測データを要していた。したがって、モータ最適設計に適用するために、応力特性の高精度で効率的なモデル化手法の開発が求められている。

物理的なモデル化手法 一方で、マイクロ磁気学的検討による磁化解析技術が進展し、鉄芯材料の基礎的な物性データからその磁気特性を測定によらずに予測する手法の開発が進められている。申請者らは平成 26～28 年度科研費「機械的応力を考慮したマルチフィジクス鉄芯材料磁気特性モデルの研究」により、材料の物性データから鉄芯の磁気特性を予測・模擬する物理的モデル化手法(集合磁区モデル, 図 1)を開発し、磁気特性の応力依存性を再現することに成功している(図 2)。本手法は、磁区構造のモデル化とエネルギー極小化に基づく物理的な手法であり、磁化過程を左右する各種要因(磁気異方性、外部磁界、減磁界など)をエネルギーの形で陽に考慮することができる。したがって、磁気弾性エネルギーの項を加算するだけで、機械的応力が磁気特性に及ぼす影響を考慮することが可能である。そのため、様々な応力あるいは磁化方向に対応した磁化シミュレーションが可能であるが、磁気計測手法による制限により、応力と磁化の方向が一致しない場合については、モデル化手法の検証が進んでいない。

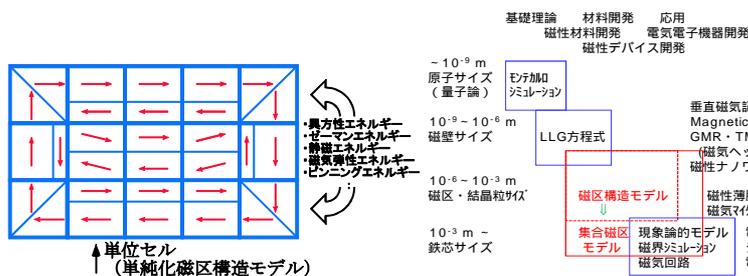


図 1 集合磁区モデル(左：概略図、右：位置づけ)

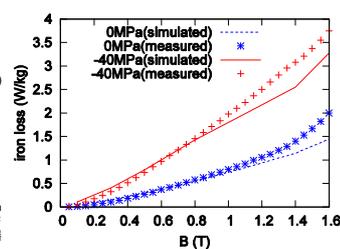


図 2 応力による鉄損の増加

2. 研究の目的

応力下における鉄芯材料のベクトル磁気特性を簡易に計測可能なシステムを開発し、計測結果を用いて、鉄芯材料の物理的モデルである集合磁区モデルを検証する。さらに、計測結果と集合磁区モデルによる計算結果を用いて、実用的な等価応力モデルを開発する。

- (1) 圧電フィルムを用いて円盤試料に機械的な応力を印加し、ベクトル励磁により応力の方向に依らない任意方向の磁気特性を測定できるシステムを開発する。
- (2) 上記の結果を用いて、集合磁区モデルの応力依存特性の再現性の検証を行い、必要に応じてモデル化手法の改良により高精度化する。
- (3) (1)の計測結果および(2)のモデルによる計算結果を用いて、等価応力モデルを開発する。

3. 研究の方法

(1) 応力下でのベクトル磁気特性の計測手法の開発

円盤試料を用いたベクトル磁気特性計測システムは開発済であるので、その試料に圧電フィルムを接着し(図3)、圧縮/引張り応力を印加する機構を追加する。印加応力については、圧電フィルムへの印加電圧・磁歪の計測結果から概算値が得られるが、一次元応力印加単板磁気試験器による正確な計測結果(図4)を用いて検証・校正する。

(2) 集合磁区モデルの検証と改良

鉄芯材料の物理的モデルである集合磁区モデルについては、一方向の磁気特性の応力依存性を再現可能なことが検証されている。上記の計測結果を用いて、応力印加方向とは異なる方向の磁気特性の再現性を検証し、集合磁区モデルの改良を行う。特に、ピンニング磁界分布について、無応力下での測定結果から試行錯誤によらずに設定可能な手法を開発する。

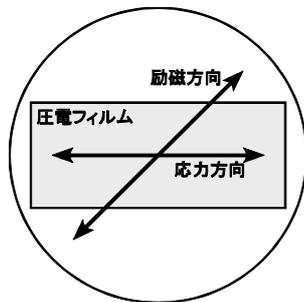


図3 一方向応力

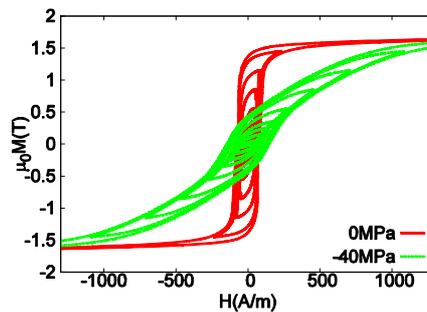


図4 応力依存ヒステリシス特性

(3) 一方向応力下での等価応力モデルの開発

前述のように、応力下のベクトル磁気特性の計測は現状で容易でなく、計測時間とデータ量が膨大になる。そこで、一方向の応力依存磁気特性の測定から、任意方向の磁気特性の応力依存性を予測する等価応力モデルを開発する。

4. 研究成果

(1) 応力下でのベクトル磁気特性の計測手法の開発

まず、円盤試料を用いた既存のベクトル磁気特性計測システムにおいて、円盤試料に圧電フィルムを接着し、圧縮応力を印加する機構を追加した。印加応力と圧電フィルムへの印加電圧との関係については、一次元応力印加単板磁気試験器による計測結果との比較により校正した。応力印加方向と異なる方向の磁化特性について、他研究機関による計測結果と比較して妥当な計測結果を得ている。

他方で、応力の影響を受けやすいと考えられる0.2mm厚の無方向性電磁鋼板の応力依存磁気特性の計測を行った。

次に、円盤試料と圧電フィルムを用いたベクトル磁気特性計測システムにおいて、歪みゲージによる計測を追加することにより、フィルムへの印加電圧と印加応力との関係が算出可能になった。これにより、別の応力印加測定装置との結果比較をせずに印加応力を算出できるようになった。構築した測定装置により、新たな無方向性電磁鋼板の応力依存磁気測定を実施した。

さらに、応力を印加する圧電フィルムについて、2枚並列に接着することで応力印加を効果的に行うことを可能にし、磁気特性の応力依存性測定の精度を改善した。

(2) 集合磁区モデルの検証と改良

鉄芯材料の物理的モデルである集合磁区モデルについて、応力印加方向とは異なる方向の磁気特性の表現能力を検証した。また、部分的陰的解法を導入することにより、集合磁区モデルにおけるエネルギー最小化の計算コストを削減する手法を開発した。開発手法により、計算時間を大幅に短縮することが可能になった。開発した高速モデルにより、鋼板厚み方向のセル分割の影響を検討した。

次に、集合磁区モデルの計算高速化のため、静磁界計算を簡略化する2つの手法を開発した。すべての多磁区粒子の磁化を平均して減磁界を算出する平均磁化モデルと、多磁区粒子が磁氣的に独立であると近似して減磁界を算出する独立近似モデルである。両者とも鋼板の形状から決定される減磁界係数を用いることにより静磁界計算を高速化できる。後者では、磁氣的相互作用を陽に考慮したモデルと比較して、応力依存性の予測精度を損なうことなく計算時間を大幅に短縮することに成功した(図5)。これは、多数の多磁区粒子のエネルギー極小化を同時に行う必要がないことが効果的であることによる。これに対して、前者の手法では、高速化の効果が限定され、応力依存性の予測精度も高くない結果となった。

上記の成果を利用すると、ベクトルストップモデルの同定法を利用してピンニング磁界を算出して集合磁区モデルに組み込むことが可能になる。すなわち、応力が存在しないときの磁気特性から得られるストップヒステロンの2次元/3次元分布からピンニング磁界の分布を推定することにより、圧縮応力印加時のヒステリシス損の増加を予測することを可能にした。さらに、同様にして、ベクトルプレイモデルの同定法を利用してピンニング磁界分布を同定する手法を開発した。これらの手法により、磁区モデルに用いるピンニング磁界を試行錯誤的な推定手法によらずに、無応力時の磁気測定結果から直接算定することができる。プレイモデルを用いる方法により、ストップモデルを用いる方法と比較して、集合磁区モデルにおける応力特性の予測精度を向上させた。すなわち、材料定数と、無応力時のBHループの測定結果を用いて、応力印可時の磁気特性を予測することが可能になった(図6)。

最後に、高磁束密度領域で収束性および精度が低下する問題を解決するために磁壁移動と磁化回転に基づく磁気エネルギー極小化を2段階で行う手法を開発した。まず、中磁束密度までの範囲において、従来モデルと磁壁移動のみによるモデルの計算結果がほぼ一致することを確認した。その後、磁化回転を考慮して、再度エネルギー極小化を行うことで、高磁束密度領域における収束性を改善した。

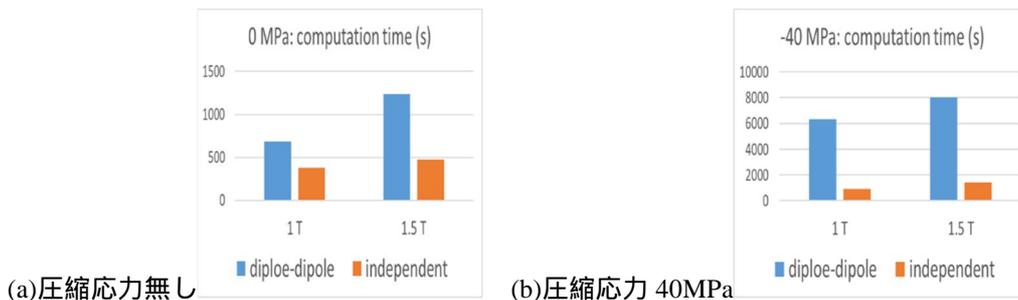


図5 磁区モデルにおける計算時間の短縮(diploe-dipole: 従来モデル, independent: 独立近似モデル)

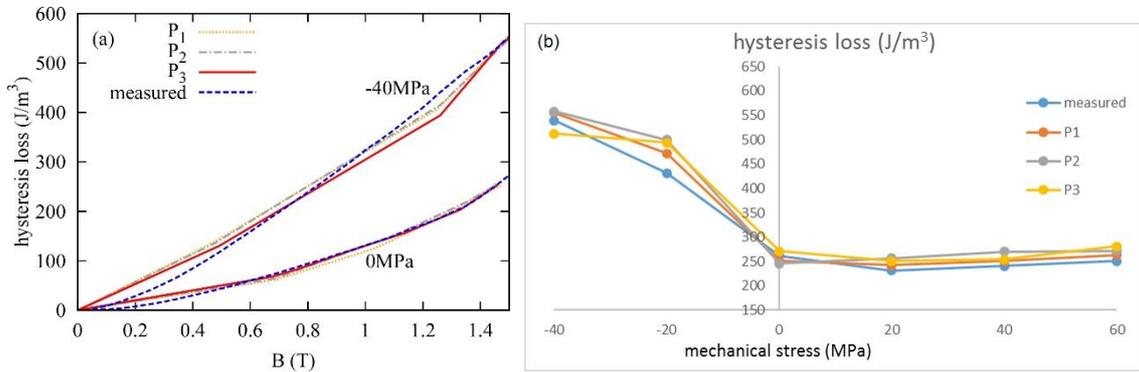


図 6 ヒステリシス損に対する応力の影響: (a) 振幅特性, (b) 応力依存性 (1.5T)

(3) 等価応力モデルの検討

応力下のベクトル磁気特性の計測は現状で容易でなく,計測時間とデータ量が膨大になる。そこで,一方向の応力依存磁気特性の測定結果から,任意方向の磁気特性の応力依存性を予測する等価応力モデルを導入した。等価応力モデルとしては,磁化あるいは磁界方向への応力換算値を用いて影響を表現する方法を用いた。実測結果および計算結果との予備的な比較検討により,等価応力モデルが効果的に応力特性を表現できる可能性を示した(図7)。

上記の応力モデルは,磁界方向に対する応力の効果を評価するのに適しているが,応力方向およびその直角方向における磁気特性への影響の評価は正確でない。また,ヒステリシス損への影響の評価については精度に欠ける。そこで,応力の方向とその直角方向に分解して,磁気特性への影響を記述する主応力分解モデルを検討した。磁束密度ベクトルを応力方向と直角方向に分解し,それぞれの方向で応力の効果を評価する。圧縮応力を印加する場合,直角方向に無応力として評価すると,磁気特性への影響が不正確になるが,直角方向には引っ張り応力に換算することで,直角方向への応力の効果を評価できることを数値モデルにより示した。ヒステリシス損についても応力の効果の評価精度を改善できた。

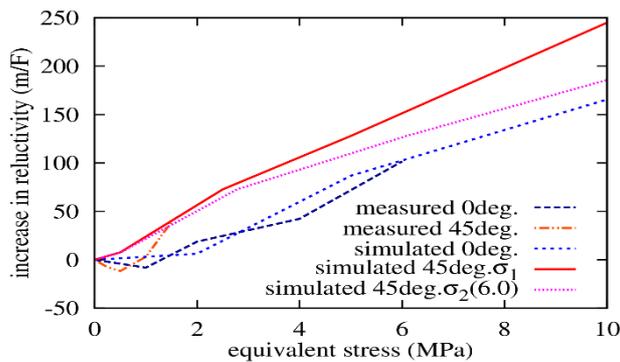


図 7 等価応力モデルの検証(励磁方向が異なっても,等価応力に換算することにより,磁気抵抗率の低下に及ぼす応力効果はほぼ同じになる)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Matsuo Tetsuji, Takahashi Yasuhito, Fujiwara Koji	4. 巻 499
2. 論文標題 Pinning field representation using play hysterons for stress-dependent domain-structure model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 166303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmmm.2019.166303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nishikubo Atsushi, Ito Shumpei, Mifune Takeshi, Matsuo Tetsuji, Kaido Chikara, Takahashi Yasuhito, Fujiwara Koji	4. 巻 8
2. 論文標題 Efficient multiscale magnetic-domain analysis of iron-core material under mechanical stress	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 56617
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5007005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Tejima Shogo, Ito Shumpei, Mifune Takeshi, Matsuo Tetsuji, Nakai Tomoo	4. 巻 53
2. 論文標題 Partially Implicit Method for Fast Magnetization Analysis Using Assembled Domain Structure Model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2017.2661338	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ito Shumpei, Mifune Takeshi, Matsuo Tetsuji, Kaido Chikara, Takahashi Yasuhito, Fujiwara Koji	4. 巻 137
2. 論文標題 Magnetomechanically Coupled Domain Model of Electrical Steel Sheet for Electric Machine Core	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電学論B	6. 最初と最後の頁 736-741
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejpes.137.736	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ito Shumpei, Mifune Takeshi, Matsuo Tetsuji, Kaido Chikara, Takahashi Yasuhito, Fujiwara Koji	4. 巻 8
2. 論文標題 Simulation of the stress dependence of hysteresis loss using an energy-based domain model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 47501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4993661	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ito Shumpei, Mifune Takeshi, Matsuo Tetsuji, Kaido Chikara, Takahashi Yasuhito, Fujiwara Koji	4. 巻 138
2. 論文標題 Domain Structure Model Including Pinning Effect Based on the Statistical Density Function	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電学論A	6. 最初と最後の頁 71-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.138.71	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 T. Matsuo, Y. Nishimura, Y. Mishima, T. Mifune, Y. Takahashi, K. Fujiwara
2. 発表標題 Pinning Field Modeling Using Stop Hysterons for Multi-domain Particle Model
3. 学会等名 22th Conference on Computation of Electromagnetic Fields, Paris, France (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Matsuo, Y. Takahashi, K. Fujiwara
2. 発表標題 Pinning Field Model Using Play Hysterons for Stress-Dependent Domain-Structure Model
3. 学会等名 24th Soft Magnetic Materials Conference, Poznan, Poland (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松尾哲司, 三島隆
2. 発表標題 多磁区粒子集合モデルを用いた電磁鋼板に対する等価応力理論に関する検討
3. 学会等名 電学静止器・回轉機合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村悠希, 服部智瑛, 美舩健, 松尾哲司
2. 発表標題 磁氣的に独立な多磁区粒子を用いた電磁鋼板磁化解析に関する検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回轉機合同研究会, SA-18-074/RM-18-093
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Nishimura, T. Hattori, T. Mifune, T. Matsuo
2. 発表標題 Efficient Magnetization Analysis of Silicon Steel Using Magnetically Independent Particles
3. 学会等名 18th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Hangzhou, China (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西窪篤志, 美舩健, 松尾哲司
2. 発表標題 部分的陰的解法を用いた集合磁区モデルによる電磁鋼板の磁化解析に関する検討
3. 学会等名 電学マグネティックス研資MAG-17-123
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S Ito, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, Y. Takahashi, K. Fujiwara
2. 発表標題 Simulation of Stress Dependence of Hysteresis Loss using an Energy-Based Domain Model
3. 学会等名 23th Soft Magnetic Materials Conference, Sevilla, Spain, P3-31 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Matsuo
2. 発表標題 Energy-Based Multiscale Modeling of Magnetic Material
3. 学会等名 JSST 2017 Intl. Conf. Simulation Technology, Symposium on Numerical Simulation and Visual Analytics of Nonlinear Problems, Session 14 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Nishikubo, S. Ito, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, Y. Takahashi, K. Fujiwara
2. 発表標題 Efficient Multiscale Magnetic-Domain Analysis of Iron-Core Material under Mechanical Stress
3. 学会等名 62th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Pittsburgh, U.S.A., BU-03, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西窪篤志, 美船健, 松尾哲司, 開道力, 高橋康人, 藤原耕二
2. 発表標題 部分的陰的解法を用いた集合磁区モデルによる電磁鋼板の磁化解析に関する検討(その2)
3. 学会等名 電学マグネティックス研資 MAG-17-190
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	藤原 耕二 (Fujiwara Koji) (20190093)	同志社大学・理工学部・教授 (34310)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------