

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420232

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Study on a multi-physics model of magnetic properties of iron-core material taking into account mechanical stress

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：異方性定数などの材料データから鉄芯の磁気特性を模擬する物理的モデル化手法に機械的応力の影響を取り込み、応力が磁気特性に及ぼす影響を予測するマルチフィジクス手法を開発した。電磁鋼板のベクトル磁気特性及び磁歪特性、磁気特性の応力依存性の測定を行った。6磁区の単純磁区構造モデルを単位セルとした集合磁区モデルを開発し、方向性電磁鋼板の各方向交番磁化特性を再現するとともに、無方向性電磁鋼板の磁気特性の応力依存性を再現した。ピンニング磁界の分布を仮定することにより、圧縮応力による鉄損増加を予測し、計測値と一致する結果を得た。集合磁区モデルにおける効率的なエネルギー極小化のために部分的陰的解法を開発した。

研究成果の概要(英文)：A multi-physics model of iron-core material is developed to take into account the effect of mechanical stress on the magnetic properties. Stress dependent magnetic properties and vectorial magnetic and magnetostrictive properties of silicon steels were measured. An assembled domain structure model (ADSM) is developed using the 6-domain simplified domain structure model as unit cell. The ADSM is a physical model that can predict the magnetic properties from basic material parameters such as the anisotropy constant and the magnetostriction constant. The deterioration of magnetic property of non-oriented silicon steel sheet is reconstructed by the ADSM. Assuming a distribution of pinning field, the ADSM predicts the iron-loss increase due to the applied compressive stress, which agrees with measured loss property depending on the stress. A partially-implicit method is developed to accelerate the energy minimization in the ADSM.

研究分野：電気工学

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

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) モータ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。その結果、研究代表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、電磁界解析に应用されている。

### (2) 鉄芯材料の応力特性

しかし、近年、機械的応力の影響の重要性が明らかになっており、機器製造時に鉄芯に加わる応力が磁気特性の劣化を招くことが問題となっている。そのため、鉄芯材料の応力依存性を測定する技術の開発が進み、応力の影響が明らかにされつつある。しかし、現在、応力特性の有効なモデル化手法が確立されていないため、ベクトルヒステリシス現象の応力依存性の表現には膨大な計測データを要するのが現状である。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急務である。

### (3) 物理的なモデル化手法

一方で、鉄芯材料の基礎的な物性データからその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、マイクロ磁気学的検討による磁化特性解析が進展しており、また、材料の組成や結晶方位などから基礎的な磁気特性を再現する手法の開発が進んでいる。研究代表者らも平成 23-25 年度科研費「電気機器限界設計のための鉄芯材料最適化手法の研究」により、材料の物性データから鉄芯の特性を予測・模擬する基本的な手法を開発している。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モデル化手法であり、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し、その影響を明らかにすることが容易である。したがって、機械的応力の磁気特性への影響も、弾性エネルギーの項を加算することにより算出することが可能であると考えられる。

## 2. 研究の目的

鉄芯材料磁気特性に対する機械的応力の影響をエネルギー方程式として表現する手法を開発し、磁気特性の応力依存性の計測結果との比較により、同手法の有効性を検証することを目指す。

(1) 機械的応力としては、外部から加わる応力と磁歪により内部的に発生する応力の 2 種類が重要であり、両者の影響を弾性エネルギーの形で記述する方法を開発する。機械的な境界条件および磁気異方性を同時に考慮

してエネルギー方程式を導出する。さらに、エネルギー極小化計算の効率化を図り、実用的な計算時間における大規模モデルの解法を開発する。

(2) 鉄芯材料の各種磁気測定を行い、主に、磁歪とベクトル磁化過程の関係、外部応力が鉄芯各方向磁化特性に及ぼす影響を明らかにする。

(3) (2)の計測結果により(1)のモデル化手法を検証する。

## 3. 研究の方法

### (1) 電磁鋼板の磁気特性計測

応力依存集合磁区モデルの検証のため、電磁鋼板の磁歪特性および磁気特性応力依存性の計測を行った。

磁歪により鉄芯内部に生じる応力は、磁化過程に大きな影響を及ぼす。そこで、歪ゲージを用いて、電磁鋼板のベクトル励磁時の磁歪特性を計測し、磁歪から磁区構造の変化を検出した。

無方向性電磁鋼板に引張および圧縮応力を外部から印加した状態で磁気計測を行い、磁気特性の応力依存性を測定した。

### (2) 応力依存簡易モデルの開発

外部から加わる応力と磁歪の相互作用の影響を弾性エネルギーの形で記述する方法を開発した。まず、鋼板の内部応力を一様と仮定することにより、磁気異方性と同様に陽的な形で磁気弾性エネルギー項を導出した。一方で、中間スケールの単位セルとして単純化磁区構造モデルを用い、その集合としてマクロスケールの鉄芯磁化過程をモデル化し、上記の磁気弾性エネルギーを組み込んだ。さらに、平均磁化ベクトルを既知として磁化特性を算出する手法を開発し、回転磁化特性の解析を可能にした。

### (3) 応力依存詳細モデルの開発

材料内の磁区構造は一般に一様でなく、磁歪の発生する方向も非一様である。歪量は、応力と機械的な境界条件の兼ね合いで定まるため、この機構をモデル化することにより、より現実に近い応力依存性が表現されると考えられる。この詳細な集合磁区モデル化手法を開発し、計測データおよび簡易モデルとの比較によりその有効性を検証した。

### (4) ピンニング磁界のモデル化

機械的応力により増加する損失はヒステリシス損であり、ヒステリシス損は鋼板内部の磁壁ピンニングにより生じる。そこで、ピンニング磁界の密度関数を仮定することにより、集合磁区モデルに組み込み可能な形で磁壁ピンニングのモデル化を行った。

### (5) エネルギー極小化高速解法の開発

大規模界解析に対応するため、効率的なエネルギー極小化の計算手法を開発した。

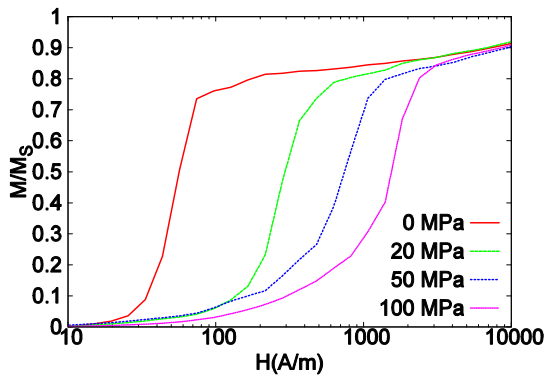
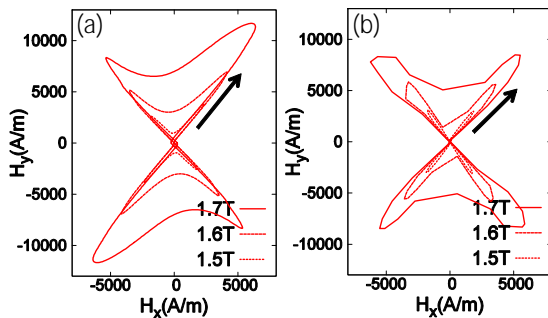
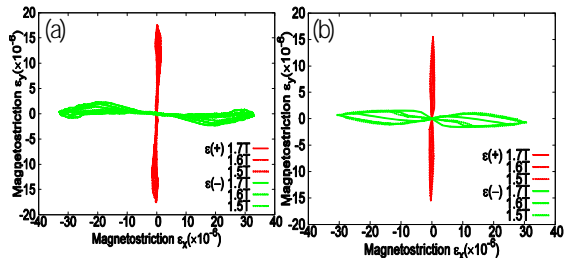


図 1 無方向性電磁鋼板の磁化特性の応力依存性



(a) 計測結果 (b) 計算結果

図 2 回転磁束下における方向性電磁鋼板の磁界ベクトル軌跡



(a) 計測結果 (b) 計算結果

図 3 回転磁束下における方向性電磁鋼板の磁歪

#### 4. 研究成果

##### (1) 電磁鋼板の磁気特性計測

交番および回転磁束条件のベクトル励磁時における電磁鋼板の磁歪特性の計測を行った。また、無方向性電磁鋼板に引張りおよび圧縮応力を印加した状態で磁気計測を行い、磁化特性および鉄損特性の応力依存性の測定データを得た。

##### (2) 応力依存簡易モデルの開発

まず、電磁鋼板の立方磁気異方性に基づいて、6磁区単純磁区構造モデルを単位セルとした集合磁区モデルを開発した。その結果、現実的な90度磁壁移動の表現が可能となり、方向性電磁鋼板の圧延方向および直角方向の交番磁化特性の表現に成功した。また、磁

気弾性エネルギーの項を追加することにより、無方向性電磁鋼板の交番磁化特性に対する機械的応力の影響を表現することに成功した(図1: 圧縮応力により透磁率が減少している)。さらに、回転磁束条件下および各方向交番磁束条件における方向性電磁鋼板の磁化特性および磁歪特性の再現に成功した(図2, 図3)。いずれも、異方性定数などの材料定数からマクロ磁化特性を再現したもので、計測結果と定量的な一致を得ている。

##### (3) 応力依存詳細モデルの開発

結晶粒とそれを取りまく多結晶媒質間の弾力的な相互作用をモデル化することにより、歪量や応力の鋼板内分布を考慮した、より現実に近い応力依存詳細集合磁区モデル化手法を開発した。応力特性の計測データおよび簡易モデルとの比較によりその有効性を示した(図4は内部応力と磁区の分布の例)。ベクトル励磁下の磁気特性および磁歪特性の計測データとの比較に対しても高い再現性を示した(図5: 圧縮応力による磁気抵抗率の増加を精度よく再現している)。

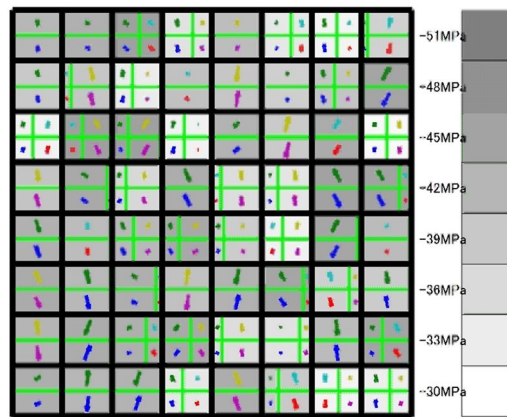


図 4 内部応力と磁区の分布の模式図

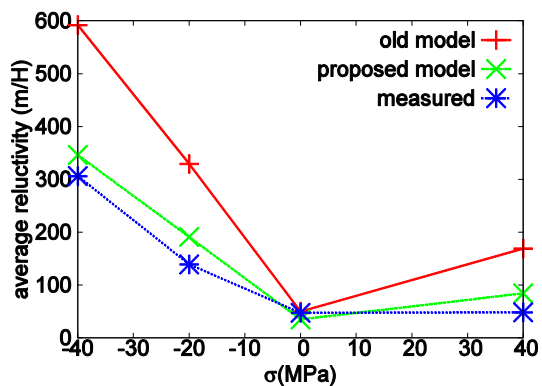


図 5 磁気抵抗率の応力依存性の再現 (old model: 簡易モデル, proposed model: 詳細モデル)

##### (4) ピンニング磁界のモデル化

ピンニング磁界の統計的な分布を仮定するモデル化を行った。集合磁区モデルに組み込むことにより、電磁鋼板のヒステリシス特性を再現し、圧縮応力印加時の鉄損増加量を

予測することに成功した。無応力状態における磁気特性からピンニング磁界の密度関数を推測し、ストップヒステロンを用いて、これを集合磁区モデルに組み込むことにより応力依存解析を可能にした。図4は図の水平方向に圧縮応力を印加した際に生じる磁区分布の模式図である。応力方向には磁化しにくくなり、応力方向に向く磁区が減少している。そのため、応力方向のピンニング磁界が増加する。図6は40MPaの圧縮応力による鉄損の増加を示しており、計測結果と一致する結果を得ている。

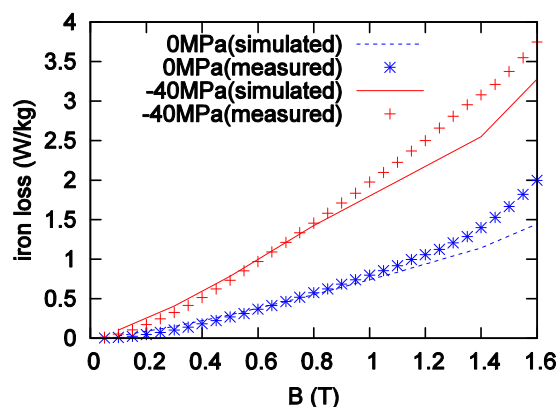


図6 鉄損の計算結果

#### (5) 磁区モデルの高速解法の開発

効率的なエネルギー極小化の計算手法として、他セルからの減磁界の影響のみ陽的に取り扱う部分的陰的解法を開発し、大幅な計算速度向上を実現した。

#### 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 5 件)(全て査読有)

1. S. Ito, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, Macroscopic Magnetization Modeling of Silicon Steel Sheets Using the Assembly of Six-domain Particles, *J. Appl. Phys.*, Vol. 117, 17D126, May 2015. doi: 10.1063/1.4915105.
2. T. Nakamura, S. Ito, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, Representation of Magnetization Process Based on Bifurcation Property of Domain Structure, *J. Appl. Phys.* Vol. 117, 17E516, May 2015. doi: 10.1063/1.4918637.
3. T. Matsuo, T. Nakamura, S. Ito, T. Mifune, C. Kaido, Efficient Methods for Macroscopic Magnetization Simulation Described by the Assembly of Simplified Domain Structure Models, *Advanced Electromagnetics*, Vol. 4, No. 1, pp. 16-21, May 2015.
4. S. Ito, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, Energy-Based Magnetization and Magnetostriction Modeling of Grain-oriented Silicon Steel under Vectorial Excitations, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 52, No. 5, 2002604, May

2016. doi: 10.1109/TMAG.2016.2519602.

5. S. Tejima, S. Ito, T. Mifune, T. Matsuo, T. Nakai, Partially-Implicit Method for Fast Magnetization Analysis Using Assembled Domain Structure Model, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 53, No. 6, Jun. 2017. doi: 10.1109/TMAG.2017.2661338

〔学会発表〕(計 18 件)

1. 中村友洋, 伊藤俊平, 美船健, 松尾哲司, 開道力, 集合磁区モデルの高速計算に関する検討, 電学マグネティクス研資 MAG-14-104, 2014.
2. 伊藤俊平, 美船健, 松尾哲司, 開道力, 6 磁区モデルの集合による電磁鋼板の磁化過程表現に関する検討, 電学マグネティクス研資 MAG-14-105, 2014.
3. T. Nakamura, S. Ito, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, Representation of Magnetization Process Based on Bifurcation Property of Domain Structure, 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Honolulu, USA, CH-06, 2014.
4. S. Ito, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, Macroscopic Magnetization Modeling of Silicon Steel Sheets Using the Assembly of Six-domain Particles, 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Honolulu, USA, HP-03, 2014.
5. T. Matsuo, T. Nakamura, S. Ito, T. Mifune, C. Kaido, Efficient Methods for Macroscopic Magnetization Simulation Described by the Assembly of Simplified Domain Structure Models, (invited), 3rd Advanced Electromagnetics Symposium, Hangzhou, China, SP2, 2014.
6. 伊藤俊平, 美船健, 松尾哲司, 開道力, ベクトル励磁下における方向性電磁鋼板の磁化及び磁歪モデリングに関する検討, 電学マグネティクス研資 MAG-15-066, 2015.
7. S. Ito, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, Energy-based Magnetization and Magnetostriction Modeling of Grain-Oriented Silicon Steel under Vectorial Excitations, 22th Soft Magnetic Materials Conference, Sao Paulo, Brazil, CM-02, 2015.
8. S. Ito, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, Stress Dependent Multiscale Representation of Magnetization of Grain-Oriented Silicon Steel Using Assembled Domain Structure Model, 13th Joint MMM/Intermag Conference, San Diego, USA, HD-02, 2016.
9. 開道力, 松尾哲司, 宮田健治, 李燦, 田子一農, 中野智仁, 無方向性電磁鋼板における磁気飽和領域の磁気挙動とモデル化, 電学静止器・回転機合同研資 SA-16-001/RM-16-001, 2016
10. 伊藤俊平, 美船健, 松尾哲司, 開道力, 高橋康人, 藤原耕二, 内部応力の分布を考慮

した電磁鋼板の磁化過程表現に関する検討，電学静止器・回転機合同研資 SA-16-003/RM-16-003, 2016.

11. S. Ito, T. Mifune, T. Matsuo, C. Kaido, Magnetomechanically Coupled Domain Model of Silicon Steel Sheet, Advanced in Magnetism, Bormio, Italy, 2016.
12. 開道力, 藤原耕二, 高橋康人, 松尾哲司, 宮田健治, 田子一農, 中野智仁, 無方向性電磁鋼板打抜加工端の算定磁気特性, 電学マグネティックス研資 MAG-16-082, 2016.
13. 伊藤俊平, 美船健, 松尾哲司, 開道力, 高橋康人, 藤原耕二, 磁区構造モデルにおけるベクトルストップモデルを用いた分布ピンニング磁界表現に関する検討, 電学マグネティックス研資 MAG-16-083, 2016.
14. 伊藤俊平, 美船健, 松尾哲司, 開道力, 高橋康人, 藤原耕二, ピンニングサイトの分布を考慮した集合磁区モデルによる磁化過程解析, H28 電学・基礎・材料・共通部門大会, 6-B-p1-1, 2016.
15. 手島彰吾, 伊藤俊平, 美船健, 松尾哲司, 集合磁区モデルを用いた磁化過程解析に対する部分陰的手法の導入, H28 電学・基礎・材料・共通部門大会, 6-B-p1-2, 2016.
16. S. Ito, T. Mifune, T. Matsuo, Y. Takahashi, K. Fujiwara, C. Kaido, The domain structure model including pinning effect based on the statistical distribution function, 17th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Miami, U.S.A., MP022-6, 2016.
17. S. Tejima, S. Ito, T. Mifune, T. Matsuo, Semi-implicit Method for Fast Magnetization Analysis Using Assembled Domain Structure Model, 17th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Miami, U.S.A., WP082-1, 2016.
18. 開道力, 藤原耕二, 高橋康人, 松尾哲司, 宮田健治, 田子一農, 中野智仁, 無方向性電磁鋼板の打抜加工部磁気挙動とモデル化, 電学静止器・回転機合同研資 SA-16-057/RM-16-103, 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

[http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/kenkyu/multiscale\\_magnetics.html](http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/kenkyu/multiscale_magnetics.html)

## 6. 研究組織

### (1)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

### (2)研究分担者

藤原耕二 (FUJIWARS, Koji)  
同志社大学・理工学部・教授  
研究者番号：20190093

開道 力 (KAIDO, Chikara)  
北九州高専・電気電子工学科・教授  
研究者番号：20373558

美船 健 (MIFUNE, Takeshi)  
京都大学・工学研究科・講師  
研究者番号：20362460

### (3)連携研究者

高橋康人 (TAKAHASHI, Yasuhito)  
同志社大学・理工学部・准教授  
研究者番号：90434290