

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289084

研究課題名(和文) 逆磁歪を利用した異方性制御機構の解明とそれを利用した低損失モータ用電磁鋼板の開発

研究課題名(英文) Anisotropy control by inverse magnetostriction for electrical steel for motors with low loss

研究代表者

石山 和志 (ishiyama, kazushi)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：20203036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：逆磁歪効果を利用した新しい異方性制御手法を提案するとともに、それが大量生産に適した優れた手法であることを明確化した。具体的には、現在表面絶縁のために用いられているコーティング材料と地金との間の熱膨張係数の差を利用することで地金に面内均一な応力を与えることができ、それにより磁化の垂直方向成分を減じ、結果として面内渦電流損失を低減できることを明らかにした。この成果は、異方性制御手法という磁気工学あるいは磁性材料学の基礎検討であるとともに、エネルギー消費を驚異的に低減できる新たな材料開発であり極めて価値の高い研究である。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the iron loss of electrical steel for motors, we have to control the magnetic easy axes which orient to thick-direction of the electrical steels due to random orientation of crystal grains. An in-plane eddy current loss associated with thick-direction change of magnetic flux will be reduced when the thick-direction components of the magnetization can be turned toward in-plane of the electrical steels. Therefore, to obtain a basic relation, we investigated magnetic properties of electrical steels under uniform in-plane stress. As a result, it is clearly observed that the magnetization increases with tensile stress, and decreases with compressive stress. It is expected that the magnetizations of thick-direction were rotated to in-plane by applying tensile stress. These results shows the proposed method can reduce the iron loss of the electrical steels.

研究分野：磁気工学

キーワード：磁気異方性 電磁鋼板 渦電流損失 逆磁歪効果

1. 研究開始当初の背景

エネルギー使用量、特に電気エネルギー使用量の削減は急務課題である。日本の総発電量約1兆 kWhのうち、その半分の約500億 kWhはモータで消費されており、モータの高効率化こそが電気エネルギー削減の最重要課題である。本研究では、モータで使われている電磁鋼板の損失を低減することで、電気自動車の航続距離を飛躍的に高め、さらに社会全体の電力消費量を大幅に低減させることを可能にするもので、現在世界が直面しているエネルギー問題に新たな解決策を与える重要な意義を持つことを踏まえ、研究を開始した。

モータの高効率化には、磁束を集める役割を担う電磁鋼板の低損失化が急務である。しかしながらその用途に使われる無方向性電磁鋼板の損失低減化の傾向は著しく鈍っている。それは100年にも及ぶ電磁鋼板の開発の中で、高純度化、高抵抗化、結晶粒徑制御、薄板積層などの低損失化技術がすでに大量生産レベルの限界まで高められているためである。しかしながらその研究にはいまだ解決できない大きな課題を残している。それはアノマリーファクターの存在である。

モータ用電磁鋼板はその板面内に磁束を通すように使われる。その際に生じる渦電流でのジュール発熱(渦電流損失)は電磁気学の簡単な知識で計算できる。しかしながら実際の損失は計算値の2倍程度生じることが知られており、計算値と実測値の比をアノマリーファクター、すなわち異常損失と呼んでいる。これこそが現在のモータ用電磁鋼板の低損失化を阻む最大要因である。

このアノマリーファクターの原因は面内を流れる渦電流損失にある。すなわち鋼板面内だけに磁束を流すべきモータ用電磁鋼板に、三次元で等方的な材料を用いているため、面内に磁界を印加した場合でも磁束が板厚方向成分を有してしまい、それにより面内に渦電流が大きく流れ、極めて大きな損失を生じるのである。しかしながら冶金学的な金属組織制御で二次元面内のみに異方性を有する材料を実現することは不可能である。

そこで申請者らはまったく新しい手法により、板面内方向に強い磁気異方性を生じさせ、それにより磁化の板厚方向成分を減じることを提案した。その手法とは逆磁歪効果を利用した異方性制御である。申請者らは面内一様な応力を与えることにより磁化の垂直成分を減じ、かつ面内等方的な磁気特性を維持できることをすでに予備的実験により見出ししている(Y. Murakami, S. Agatsuma, S. Hashi, K. Ishiyama, "Magnetic Properties of non-oriented SiFe sheets under uniform in-plane stress," 21st Soft Magnetic Materials, Budapest Hungary, September 2013.)。成果を発表した国際会議でも画期的な新提案として世界中の研究者からの注目を集めた。

逆磁歪自体は材料物性等基盤的研究分野で検討が進められているが、それを面内等方的材料に適用し、無方向性電磁鋼板の損失低減につなげるアイデアは、従来の損失低減化技術とは全く異なるコンセプトに基づく極めて革新性の高い手法であると世界的にも認められている。

加えて本研究で検討対象とする逆磁歪効果による異方性制御技術は、極めて基本的な物理現象でありそのメカニズムの解明は学問的価値が高く、それと同時に提案した損失低減手法は後述のように工業化にも適した手法であることから、社会へのインパクトの高い有用性の高い研究である。

本研究遂行のためには、電磁鋼板の基本的特性並びに逆磁歪効果による異方性制御に関する基本的知識と経験が必要不可欠である。本研究代表者らはこれまで電磁鋼板の磁化機構の解析と損失発生機構に関する検討(K. Ishiyama, S. Hashi, M. Kawasaki, K. I. Arai, "Magnetostriction and Domain Structure of Grain Oriented Silicon Steel Sheets," Materials Transactions, JIM, vol.37, No.3, pp.469-472, (1996).)を行い、変圧器に使われる方向性電磁鋼板においては世界で最も低損失の材料を実現している。また、この研究とは独立に磁歪ならびに逆磁歪効果を利用した薄膜デバイスに関する研究を行っており、逆磁歪効果を用いた歪センサ(Y. Suwa, S. Agatsuma, S. Hashi, K. Ishiyama, "Study of Strain Sensor Using FeSiB Magnetostrictive Thin Film," IEEE Trans. Magnetics, Vol.46, No.2, pp.666-669, (2010).)では世界最高の感度を実現している。これらのことから、電磁鋼板と磁歪とを組み合わせた新しい材料を開発する本研究を遂行できる研究者は本研究代表者をおいて他にはない。

2. 研究の目的

本研究では、超低損失のモータ用無方向性珪素鋼板実現を最終目的として、逆磁歪効果を利用した革新的な異方性制御手法に関する検討を行う。この手法により電磁鋼板の面内渦電流損失が低減でき、かつそれが工業的生産に適した手法で実現可能であることを実証する。

そのために以下の4点を明らかにする。

張力で電磁鋼板の異方性を制御する技術を確立する。

磁歪効果、磁気弾性エネルギー、ならびに結晶磁気異方性エネルギーに基づいた考察と実験を通じて、張力と異方性の関連を明確化し、異方性制御手法を確立する。張力に伴う磁区構造の変化について特に注力して解明する。

異方性制御により損失が減少するメカニ

ズムを解明する。

前述の提案に基づき、異方性制御により減少する渦電流損失の値を算出するとともに実測により損失低減効果を明確にし、磁気モーメントの板厚方向成分変化量を定量化する。

工業的に適した手法による張力印加手法を確立する。

電磁鋼板は最も大量に生産されている磁性材料であり、製造コストの低減要求が強いため、安価な手法により張力を与える必要がある。本申請では TiN を用いた手法を検討する。

渦電流損失が現行材料の半分となるモータ用無方向性電磁鋼板を実現する。

上記の項目を総合的に検討することで、きわめて損失の小さな材料を実現する。

3. 研究の方法

張力による異方性制御技術の確立

a. 面内一様な張力の定量的印加手法確立

モータ用電磁鋼板が使われる際は、磁束の方向は面内で常に変化する。そのため板面内方向による透磁率の差がないことが要求される。本研究は板厚方向成分を持つ異方性の容易軸を張力で面内に回転させるため、面内で一様な張力を与える必要がある。そこで本研究では下記の2種類の手法で実験を遂行する。

圧電材料の厚さ方向に電界を与えて、面内一様な張力を珪素鋼板に与える。



圧電素子による張力印加手法説明図

- 面内一様な張力を印加可能
- 張力印加下で磁区観察、磁化曲線計測が可能

圧電素子を利用する方法

右上図のように電磁鋼板を圧電素子に張り付け、圧電素子に印加する電圧を変化させることにより面内一様な張力を印加する。この手法は印加電圧により定量的に張力を印加できるが、工業製品への適用は困難であることから基礎データの収集を目的とする。

熱膨張係数の異なる材料を利用する方法

熱膨張係数の異なる材料に電磁鋼板を高温環境下でセラミクス接着材等を用いて貼付することにより冷却時に面内一様な張力を

与える。貼付する際の温度を変えることにより導入する張力を変化させ得るが、張力量を連続的に変化させることは難しい。しかしながら張力量の最適値が明らかになれば電磁鋼板に必要な表面絶縁被膜に用いる材料と焼付温度の選択により所望の張力が大量生産可能な手法で実現できる。

b. 磁区観察による異方性変化の直接観察

磁区を観察することで、磁区内の磁気モーメントの方向を明らかにし、異方性の変化を直接知ることが可能である。磁区観察には種々の手法があるが、本研究ではカー効果を利用した方法を用いる。この手法は磁化の特定一軸方向成分の大きさに応じてコントラスト得るものである。そのため、試料を回転させて種々の方向から観察することにより磁化ベクトルの方向を直接知ることができる。これを利用して張力印加による磁化の回転挙動を直接観察する。研究代表者所属機関に設備されているカー効果を利用した磁区観察装置を一部改造(アタッチメントの追加)して、本研究に使用した。

c. 張力に伴う異方性変化の計測と評価

上記の張力印加手法はいずれも大きな張力印加治具等を必要としないため、振動試料型磁化測定装置や磁気トルクメータでの精密計測が可能である。その際、圧電素子を利用する手法では、同一の試料において張力値を連続的に変化させながら計測することも可能である。これらの計測により張力印加下での異方性が定量的に評価でき、その結果、磁歪定数や材料の機械定数から、磁気弾性エネルギーを評価でき、磁化の垂直成分の変化量を定量的に算出できる。

以上の検討により、面内一様に張力を印加した際の電磁鋼板の異方性の変化について定量的に明らかにし、次章で説明する異方性と損失の関連検討のために必要なデータを完全に収集する。すでに申請者らは単結晶を用いた定性的予備実験により、面内一様な張力印加で磁化ベクトルを回転させ得ることを確認しており(K. Ishiyama, S. Hashi, Y. Shingai, "Anisotropy control of silicon steel sheet by in-plane stress," 20th International Conference on Soft Magnetic Materials, (2011).)、本検討によりこれが完全に定量化される。

異方性制御による損失低減化メカニズムの明確化

a. 異方性の変化に伴う面内渦電流損失減少量の算出

前項で張力と異方性の関連が明確化され、工業的に印加可能な大きさの張力で制御可

能な異方性の範囲が明確化される。そこで本項では、制御可能な異方性によって減少する面内渦電流損失の大きさを定量的に算出する。具体的には、電磁鋼板が有する結晶磁気異方性の大きさと、張力で制御する異方性、ならびに電磁鋼板の形状から実効的な異方性の大きさを見積り、それにより磁化ベクトルの方向を算出する。さらに、それが交流磁界中に置かれた際に磁化ベクトルが振動する量を算出し磁化の板厚方向成分変化量 M を見積もる。これにより、異方性の変化と面内渦電流損失低下の関連性が定量的に明らかになる。

b. 損失計測

上記の計算の正確性を吟味するために、張力を印加した試料の損失計測を行う。電磁鋼板の標準的な損失計測手法であるエプスタイン試験を行うには多量の試料が必要であるため、本研究では、JIS に則って単板磁気試験器を作製し、損失計測を行う。また、本研究で使用する試料サイズはJIS規格に適合しない可能性があるため、単板磁気試験器に加えて探針法による損失測定装置も構築し、合わせて実験に供する。これらの測定により、本研究が提案するアイデアの正当性を実証するとともに、損失と異方性の定量的な関連性を明確にする。

c. 総合評価と材料設計

これらの計測を通じて、申請者らの提案である張力による磁気異方性の制御が実証され、また、磁歪を仲立ちとして張力として与えた機械的弾性エネルギーが磁気異方性エネルギーに変換される様子を定量的に把握することが可能となる。そこでこれらを通じて最適な張力値を確定することで、極めて低損失の電磁鋼板を実現する。

表面被膜を用いた張力印加手法の確立

a. TiN を用いた張力被膜形成手法の検討

セラミクス材料を金属材料表面にコーティングすることで、金属材料に大きなひずみを導入することが可能である。本申請では、金属工具の摩耗防止としてすでに用いられている TiN 被覆を適用して実験を開始する。すでに実験により熱膨張係数の違いを利用した張力印加手法についての詳細データが得られていることからそれを基に適切な張力を導入可能な条件を明確にする。実験には、新たに設備する被膜焼付装置と、すでに設備されている RF スパッタリング装置を必要な被膜厚さに応じて使用する。パラメータは被膜焼付(被膜形成)温度と被膜厚さが主であるが、AlN の組成調整も必要になると考えられる。

b. ガラスコーティングを用いた張力被膜形成手法の検討

前項で検討を計画している TiN はきわめて硬いことから、被覆した電磁鋼板の切断・打ち抜き特性を劣化させる恐れもある。そこで TiN と並行してフォスファイト被膜とガラスコーティングを積層させた被膜についても検討する。この被膜は電磁鋼板のうち変圧器に用いられる方向性電磁鋼板の絶縁被膜に用いられているものであり、工業的な実績のある材料である。この場合、被膜焼付温度の制御により導入張力量の制御を行う。

本項の検討は本研究で得た基礎データを基にして実用化を目指すフェーズであり、遂行に当たっては電磁鋼板を生産している鉄鋼メーカーとの検討会を密に開催する。すでに複数の鉄鋼メーカーに本申請のアイデアを説明した上で、情報交換を行うことのできる解を得た上で実行した。

総合評価と発展研究検討

これまでの検討により、張力と損失値の関連が異方性を仲立ちとして明らかになることを踏まえ、本研究の最後のフェーズとして実用化を目指す総合検討を行う。すなわち工業的に実現可能な手法を用いて本研究で明らかになった必要張力量を得るための手法や被膜材料の選択に関する検討を鉄鋼メーカーとともに実施する。

加えて本研究で着目した逆磁歪効果を用いた磁気異方性の制御手法は、電磁鋼板以外のあらゆる磁性材料に適用可能であり、この手法を利用した新たな材料開発ならびに特性制御への発展が期待される。そこで、本研究の最終フェーズでは、異方性制御に関する理論的裏付けを強固にし、この手法が他の材料へ発展する際の規範となる基本的理論を確立し新たな学問分野としての発展を図ることも合わせて行った。

4. 研究成果

異方性制御手法として張力による異方性制御技術を提案し、その手法の妥当性を実験的に検証した。具体的には以下の手法で張力と磁気特性の関連について定量的に検討した。

1. 面内一様な張力の定量的印加手法確立: 本研究は板厚方向成分を持つ異方性の容易軸を張力で面内に回転させるため、面内で一様な張力を与える必要がある。そこで本研究では圧電素子を利用する方法と、熱膨張係数の異なる材料を利用する方法の2種類の手法を用い、それらにより定量的に制御可能な面内一様な張力を印加可能であることを明らかにするとともに、それぞれのメリットデメリット

ットを定量的に検討し、電圧で応力を制御できる圧電素子を利用する方法を基礎検討として採用した。さらに将来の量産化に向けて熱膨張差を用いる方向を民間企業と共同で検討を開始した。

2. 磁区観察による異方性変化の直接観察:カー効果を利用した磁区観察手法を用いた異方性変化の直接観察手法を確立した。この磁区観察手法は磁化の特定一軸方向成分の大きさに応じてコントラスト得るため、試料を回転させて種々の方向から観察することにより磁化ベクトルの方向を直接知ることができ、張力印加による磁化の回転挙動を明瞭に観察することが可能となった。これを踏まえ、応力と異方性の関連を定量的に検討し、その関連性を理論的考察と比較し両者の良好な一致を見た。

3. 張力に伴う異方性変化の計測と評価:上記の検討結果を踏まえ、定量的計測により張力印加下での異方性を評価した。それを通じて磁歪定数や材料の機械定数を用いて磁気弾性エネルギーを評価でき、磁化の垂直成分の変化量を定量的に算出できることを明らかにした。

以上本研究では、面内一様に張力を印加した際の電磁鋼板の異方性の変化について定量的に明らかにするとともに損失との関係を明確化した。これにより工業的に生産可能な手法で低損失磁性材料を実現できることを明らかにし、当初の目的を達成した。

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)

1. K. Iwata, M. Imafuku, T. Suzuki, T. Shobu, H. Orihara, Y. Sakai, K. Akira, S. Ohya, and K. Ishiyama, "Internal stress distribution for generating closure domains in laser-irradiated Fe-3%Si(110) steels," *Journal of Applied Physics*, vol.117, 12A910, (2015). (査読あり)
2. K. Iwata, M. Suzuki, M. Hashimoto, M. Ueda, Y. Matuoka, T. Yasue, T. Koshikawa, M. Kotsugi, T. Ohkochi, T. Kinoshita, Y. Watanabe, K. Ishiyama, "Temperature Dependence of Lancet Domains in Grain-Oriented Fe-3%Si Steels," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol.51, 2002504, (2015). (査読あり)
3. K. Iwata, M. Fujikura, S. Arai, K. Ishiyama, "Prediction method of basic domain structure in Fe3%Si(110)

single crystal," *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, vol.115, 17A341, (2014). (査読あり)

4. Keiji Iwata, Satoshi Arai, Kazushi Ishiyama, "Calculation of Basic Domain Width Considering Lancet Domains in (110)[001]Fe3%Si," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol.50, 7008604, (2014). (査読あり)
5. Keiji Iwata, Kazushi Ishiyama, Masahiko Suzuki, Michihiko Hashimoto, Masato Ueda, Yoshiaki Matuoka, Tsuneo Yasue, Takanori Koshikawa, Masato Kotsugi, Takuo Ohkochi, Toyohiko Kinoshita, Yoshio Watanabe, "Quantitative Analysis of 90° Closure Domains Occurring by Compressive Stress in Fe3%Si(110) Steels," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol.50, 2007004, (2014). (査読あり)

[学会発表](計1件)

1. Temperature dependence of lancet domains in grain-oriented Fe-3%Si steels, K. Iwata; M. Suzuki; M. Hashimoto; M. Ueda; Y. Matuoka; T. Yasue; T. Koshikawa; M. Kotsugi; T. Ohkochi; T. Kinoshita; Y. Watanabe; K. Ishiyama, 2015 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG), 12 May 2015, Beijing China.

6. 研究組織

(1)研究代表者

石山 和志 (ISHIYAMA, Kazushi)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号: 20203036