

氏名	すずき たか あき 鈴 木 孝 明
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第63号
学位授与の日付	平成15年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻
学位論文題目	強磁性体の磁気的および力学的挙動に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 松本英治 教授 井上達雄 教授 小寺秀俊

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、磁気的ヒステリシスや磁気弾性結合効果を伴う強磁性体の磁気・力学的挙動について理論的な検討および実験的な検証を行った研究成果をまとめたもので、8章から成っている。

第1章の緒論では、本研究の目的および構成について述べている。強磁性体の磁気的ヒステリシスや磁気弾性結合について、各種電磁機器で果たす役割と影響、および従来の理論の問題点を指摘して、これらの現象を伴う磁気・力学的な挙動を統一して表現できる理論の必要性について述べている。さらに、連続体理論に基づく磁性体の磁気・力学的挙動の定式化の歴史を概説し、本研究における理論との関連を明らかにしている。

第2章では、強磁性体の磁気・力学的挙動についての実験結果を示すとともに、そのメカニズムを詳述している。磁化曲線を用いて強磁性体のヒステリシス、非線形性、飽和、中立磁化などの基本的な巨視的磁化特性を説明し、磁区構造の概念を用いてこれらの磁化特性を定性的に裏付ける説明をしている。さらに、磁気弾性結合がもたらす代表的な現象として、磁化曲線の応力依存性、磁歪曲線の応力依存性および応力磁化効果について実験結果を示し、その機構や磁化特性との関連などを磁区構造の概念をもとに考察している。

第3章では、電磁気材料の連続体理論に基づいて、強磁性体の磁気・力学的挙動を表す3次元構成式を導出した。提案した構成式は、物質構造論や磁区構造の概念に基づいて求められた従来の磁化特性のモデルを特別な場合として包含し、より多様な現象を統一的に表現できる。また、磁気・力学的性質が等方的である強磁性体に単軸応力とそれに平行な磁場が作用する1次元磁化過程を考え、提案した構成式より1次元構成式を導いた。さらに、局所的な平衡理論から、提案した構成式の係数行列の対称性を導いた。電磁機器の従来の解析や設計においては、磁気的ヒステリシスや磁気弾性結合を無視した古典的な線形強磁性体モデルが使われていることを示し、本論文で提案する構成式との関連を明らかにしている。

第4章では、電磁機器の解析例として、エネルギー効率の良い軸受となる高温超電導浮上系を応用した超電導モータについて、安定性の高い浮上方法と高速回転を実現するための駆動方法を提案し、そのシステムの妥当性を実験および理論解析により検証している。その結果、浮上体上端に軸下方向吸引力を作用させることで、軸上方向に吸引力を作用させるよりも安定な浮上が得られることを確認している。また、駆動方法として、永久磁石型ステッピングモータを採用し、従来型と比較して約50倍の最高回転速度が得られた。さらに、制御コイルと浮上の安定化のための永久磁石からなる制御システムを提案し、そのシステムが一次共振点の乗り越しに有効であることを確認している。このような電磁機器の解析や設計において、ヒステリシス、非線形性、磁気弾性結合などを考慮にいたした強磁性体の構成式を確立することの重要性について言及している。

第5章では、強磁性体の磁化特性の応力依存性を表現するモデルの導出と、応力下の磁化実験によるモデルの妥当性の検証を行っている。従来の磁気的モデルとして良く知られた Jiles-Atherton モデルと Preisach モデルを採用し、それらのパラメータや物質関数のうち磁区構造に関するものを応力依存性を有するように拡張している。つぎに、これらの拡張モデル

の妥当性を検証するため、ニッケルおよび低炭素鋼の応力下の磁化実験を行い、どちらの拡張モデルも複雑な印加磁場に対するヒステリシスを伴う磁化曲線を、応力依存性を含めて良く表現できることを確認している。

第6章では、応力下の磁歪曲線の定式化と実験による同定を行い、理論の妥当性を検証している。提案した定式化において、磁歪曲線が中立部分とヒステリシス部分からなり、それぞれが応力に依存する係数をもつ磁化の多項式で表現できると仮定した。また、磁歪係数の符号が異なるニッケル及び低炭素鋼の応力下の磁歪を測定し、提案する定式化がこれらの材料の磁歪曲線の高次の非線形性、ヒステリシス、応力依存性、ビラリー反転を表現できることを確認している。

第7章では、強磁性体の応力磁化効果の定式化を行い、その妥当性を応力磁化実験により検証している。第3章で提案した磁気・力学的構成式の係数の対称性を用いると、従来独立した現象として研究されてきた応力磁化効果が、第5章で得られた応力下の磁化曲線を表す構成式の係数と、第6章で得られた応力下の磁歪曲線を表す構成式の係数から定式化できることを示している。また、ニッケル及び低炭素鋼に対する実験より、種々の応力磁化効果の尺度に関して、本章の理論的予測の妥当性を検証している。また、これらの実験とともに、提案した構成式を用いたシミュレーションを援用して、磁化過程における磁場の影響と同様に、繰返し応力によっても磁化は平衡状態へと近づくことを明らかにしている。

第8章では、本研究の結果をまとめるとともに、提案した構成式に関わる今後の課題として、動的な3次元磁化過程を表す構成式への一般化と、電磁機器の解析や設計への応用の展望について述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、電磁機器の機能・効率・精度・構造的な安定性などに影響を及ぼす磁氣的ヒステリシスや非線形性、磁気弾性結合を考慮した、強磁性体の磁気・力学的挙動の理論的モデルを確立することを目的としてなされたものであり、得られた主な研究成果は以下のとおりである。

1. 電磁機器や電磁構造物の解析や設計では、磁気弾性結合や磁氣的ヒステリシスを無視した古典的な線形強磁性体モデルが用いられることが多い。このような古典的なモデルの応用例として、エネルギー効率の良い軸受となる高温超電導浮上系を応用した小型超電導モータを設計・開発した。そして、その強度や安定性、効率などに及ぼす磁気弾性結合と磁氣的非線形性やヒステリシスの影響に言及し、それらを表現できる磁気・力学的構成式を確立することによって、より精密な解析・設計が可能となることを示した。
2. 電磁気材料の連続体理論に基づいて、磁気弾性結合や磁氣的ヒステリシスを伴う磁気・力学的挙動を表す微分型の構成式を導出した。この構成式の係数には種々の物理量の任意関数が許容されるので、本構成式により従来のモデルでは困難であった強磁性体の多様な現象を統一的に表現することができる。また、提案した構成式は、様々な磁氣的、力学的条件における強磁性体の挙動の解析や、強磁性体を用いた機器および構造物の電磁構造解析や設計に適用できることを示した。
3. 磁気・力学的構成式の係数のひとつとして、従来の Jiles-Atherton および Preisach モデルを応力依存性を考慮できるように拡張した関係を採用した。種々の応力下でニッケルと低炭素鋼の磁化実験および磁歪測定を行い、提案した構成式が磁化曲線および磁歪曲線を、ヒステリシスや応力依存性などを含めて表現できることを確認した。特に、ニッケルと低炭素鋼は、低磁場では磁歪係数の符号が異なり、高磁場では低炭素鋼の磁歪係数の符号が反転するが、提案した構成式はこれらの複雑な磁歪挙動を表現できることがわかった。
4. 磁気・力学的状態空間における局所的な平衡理論を用いると、導出した構成式の係数行列には対称性が存在することを見だし、従来独立した現象と考えられてきた応力磁化効果が磁化曲線と磁歪曲線の応力依存性から導かれることを示した。ニッケルと低炭素鋼の磁場下の負荷試験によって、その理論的予測が妥当であることを実証した。さらに、周期磁場の場合と同様に、周期的な応力変化によって強磁性体の磁化が平衡状態、すなわち中立磁化へ近づくことを明らかにした。

以上の研究は、強磁性体の複雑な磁気・力学的挙動の解明につながるるとともに、各種電磁機器の精密な解析や設計、新しい非破壊評価法の開発の理論的基礎となるもので、学術上、実用上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年2月3日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。