

(論文内容の要旨)

本論文は、強磁性材料の構成式およびニッケル鉄合金の磁気弾性的挙動を論じた結果をまとめたもので、8章からなっている。

第1章の序論では、強磁性材料の様々な磁氣的、力学的および磁気弾性結合効果について概説し、これらの個々を定式化するための古典的モデル、および、磁氣的、力学的挙動を統一的に表現できる強磁性材料の構成式を示している。また、本研究の目的が、磁性材料の構成式を、非線形性、ヒステリシス、応力依存性を有する磁氣的挙動、磁場あるいは磁化に依存する力学的挙動をも表現しうるように拡張して、典型的な強磁性材料に対してその妥当性を検証することであることを述べている。

第2章では、磁化過程における強磁性材料の基礎的な概念、すなわち、磁化曲線の非線形性と飽和、メジャーLOOPおよびマイナーループ、中立磁化曲線、磁氣的異方性などの発現機構を、磁区構造とその変化から説明している。また、代表的な磁気弾性結合効果である磁歪の発現機構やその特徴についても、同様の説明を行っている。

第3章では、連続体力学に基づいて、速度型の磁気・力学的構成式を提唱している。すなわち、応力、ひずみ、磁場、磁化の速度（微分）の間の関係式からなり、それらの係数は、帯磁率、応力磁化効果、磁歪、弾性（力学的応答）を表現する接線係数からなっている。これらの4つの係数のうち、磁場下の接線弾性係数は、いままで測定が困難であり、磁場に対しては一定とされてきた。本論文では、磁場と応力下の弾性係数を求める新しい測定法を考案して、弾性係数に関する制約条件を緩和した。

第4章では、ニッケル、パーマロイ B (PB)、純鉄に応力下で周期的磁場を印加した場合の磁化実験の結果を示している。磁場を引張応力と平行に印加した場合には、ニッケルの磁化曲線は応力とともに低下し、透磁率も無応力時に最大となることを示している。PBの場合はニッケルより低磁場で磁化が飽和し、引張応力により飽和が促進されることを示した。純鉄の磁化曲線は、試験片の圧延方向に結晶粒が粗大となっている効果から、磁化曲線の傾きが急激に変化して単結晶の特徴を併せもつことを示している。また、応力による磁化曲線の変化はニッケルや PB に対して少ないことを示している。さらに、磁場によるひずみ変化（磁歪曲線）の特徴やその応力依存性、磁場を引張応力に対して垂直方向に印加した場合の磁化曲線や磁歪曲線についても、ニッケル鉄合金に対する測定結果を示し、その特徴を論じている。

第5章では、提案した構成式の微分帯磁率を表す係数として、磁氣的モデルとして良く知られた Jiles-Atherton モデルを拡張したモデルを導入している。応力依存性については、磁区構造に依存するパラメータを応力に線形に依存すると仮定した。この拡張モデルを導入した構成式の妥当性を検証するため、ニッケル鉄合金に対して応力下の磁化実験を行い、提案した構成式が、応力に平行に磁場を印加した純鉄の場合を除き、磁化曲線の非線形性・ヒステリシス・飽和およびそれらの応力依存性を精度よく表現できることを検証し

ている。

第6章では、高次の非線形性を考慮に入れて、周期磁場による磁歪をヒステリシスと応力依存性を含めて表現する構成式を提案した。すなわち、周期的な磁場における磁歪曲線を、中立曲線とヒステリシスギャップに分解して、それぞれを、磁化の偶関数と奇関数により表現した。応力への依存性は、応力に依存する多項式の係数により表現している。提案した磁歪のモデルが、応力依存性を含めて、ニッケル鉄合金の縦および横磁歪曲線を精度よく表現できることを検証している。

第7章では、磁場と応力下の接線弾性係数を、超音波縦波と互いに垂直方向に振動する二つの横波の速度、縦および横磁歪の測定によって求める方法を提唱している。単軸応力と磁場が平行に印加された強磁性材料では、力学的非線形性と磁気弾性結合効果により一軸異方性が生じる。ニッケル鉄合金に対して提案した方法により、一軸異方性のすべての独立な接線弾性係数を求め、それらの磁場と応力の依存性について考察している。

第8章では、本研究の結果をまとめるとともに、今後の発展方向や、電磁構造解析および非破壊評価法への応用の可能性について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は強磁性材料の磁氣的、力学的な挙動を統一して表現しうる構成式を提唱し、ニッケル鉄合金に対してその有効性を検証した研究結果をまとめたもので、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 磁気弾性結合効果を含む多様な磁氣的、力学的挙動を表すことができる強磁性材料の速度型構成式を提唱した。この構成式は、応力、ひずみ、磁場、磁化の速度の間の関係式からなり、それらの係数は帯磁率、応力磁化効果、磁歪、弾性係数を表す接線係数である。この構成式は、Maxwell 方程式や応力の平衡方程式などの保存則とともに、強磁性材料の挙動の支配方程式を構成するので、応力と磁場を受ける材料の多様な磁氣的、力学的挙動のシミュレーションを可能とする。
2. 構成式における帯磁率の接線係数に対して、従来の磁化曲線のモデルとして定評のある Jiles-Atherton モデルを、応力依存性を含むように拡張した。この拡張モデルを導入した構成式の妥当性を検証するため、引張応力下でニッケル鉄合金の磁化実験を行い、初期磁化曲線、非線形性、ヒステリシス、飽和などの磁化曲線の特徴を、それらの応力依存性を含めてよく表現できることを検証した。
3. 構成式における磁歪を表す係数に対しては、高次の非線形性を考慮に入れて、磁歪曲線のヒステリシスや応力依存性を表現できるモデルを提案した。提案した係数を含む構成式が、ニッケル鉄合金の磁歪曲線とその応力依存性を定量的に表現できることを検証した。
4. 応力あるいは磁場が印加された強磁性材料には、力学的非線形性あるいは磁気弾性結合効果により異方性が生じる。多くの電磁機器では、その磁気回路と構造の関係から応力と磁場が平行な場合が多く、その接線弾性係数は一軸異方性を示す。本論文では、複数の種類の超音波速度と縦および横磁歪を測定することにより、従来困難であった接線弾性係数の測定が可能となることを示した。ニッケル鉄合金に対してこれらの係数を求めて、その磁場と応力依存性を解明している。

本論文で提唱し、ニッケル鉄合金によって検証された強磁性材料の構成式、ならびに磁場と応力下の接線弾性係数について提案した測定法は、電磁機器や電磁構造物の詳細な磁氣的、力学的挙動の解析や設計のみならず、非破壊評価法の開発にも有用であり、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 21 年 2 月 25 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。