

氏名	こんだ しげる 近田 滋
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成28年9月26日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻
学位論文題目	電気・磁気回路網による圧粉磁心リアクトルの性能評価に関する研究
指導教員	東北大学教授 一ノ倉 理
論文審査委員	主査 東北大学教授 一ノ倉 理 東北大学教授 石山 和志 東北大学教授 中村 健二

## 論文内容要旨

ガソリン自動車の普及は環境問題の一つである大気中の CO<sub>2</sub> 量の増加の原因とされており, CO<sub>2</sub> 排出量低減は急務である。自動車産業では触媒や高効率エンジン, 軽量化による燃費向上など様々な技術課題に取り組んでいる。これらの共通課題は小型・軽量化であり, 電気自動車のモータやリアクトルなども同様である。リアクトルはバッテリー電圧をモータ駆動電圧まで昇圧する磁気デバイスである。従来のリアクトルは電磁鋼板の積層鉄心を使用することが多かったが, 更なる低損失化をめざし, 近年, 磁性粉末を用いたリアクトルが開発されパワ分野への応用が増えつつある。しかし圧粉磁心は, 粒径 20~200[ $\mu\text{m}$ ]の磁性粉と数 $\mu\text{m}$ の厚さの絶縁層で構成される特殊な構造のため, 定量的な解析・設計手法は確立されていない。本研究では, 高速計算に優れた電気・磁気回路網法に基づいて, 絶縁層を含んだ圧粉磁心の解析モデルの導出を行った。まず, 圧粉磁心一粒子の磁気特性と渦電流損失係数を算出したのち, 磁性粉で作製した環状鉄心とリアクトルコアの渦電流損失の計算に適用した。ついで, 計算に用いた環状鉄心ならびにリアクトルコアと同一の試料を作製し, その渦電流損失の実測値が計算値と良好に一致することを確認した。

第2章では圧粉磁心一粒子モデルを提案した。圧粉磁心一粒子モデルは, 図1に示すように, 磁性体を立方体

として周囲は等厚の絶縁層で覆われているものとする。この一粒子モデルは、図2に示すように、磁性体ならびに絶縁層の磁気抵抗で構成される磁気回路として表すことができる。この磁気回路から圧粉磁心一粒子の磁気特性を計算した結果を図3に示す。磁性粉の非線形な  $B-H$  曲線が良好に再現されることがわかる。

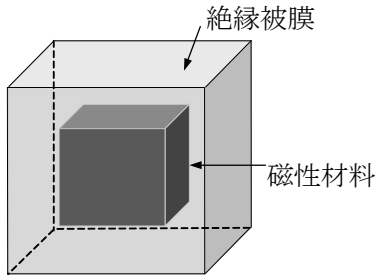


図1. 圧粉磁心一粒子モデル

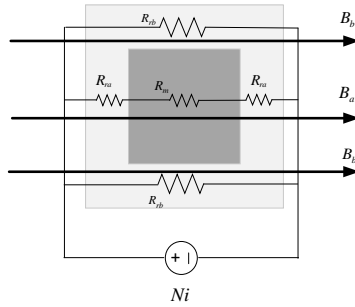


図2. 一粒子モデルの磁気回路

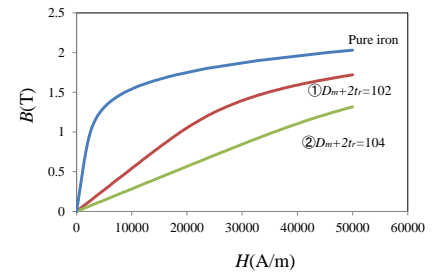


図3. 一粒子の  $B-H$  曲線

つぎに渦電流を考慮した磁気回路を考える。磁性体に交流磁界が印加されると渦電流が発生し渦電流損失となる。渦電流による反作用磁界を考慮した磁気回路と、渦電流を表す電気回路を図4(a), (b)に示す。これらの磁気回路と電気回路を同時に解くことで、図5に示すような圧粉磁心一粒子の  $B-H$  曲線を求めることができる。この  $B-H$  曲線の面積から圧粉磁心一粒子あたりの渦電流損失が計算される。本章ではさらに、スタインメッツの実験式と一粒子モデルの計算値から第3章の環状鉄心、第4章のリアクトルの計算に用いる渦電流損失係数を求めた。

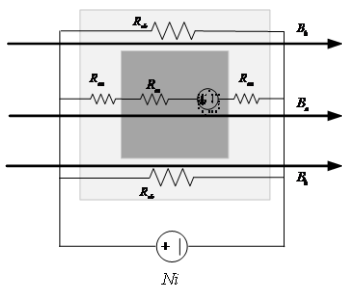
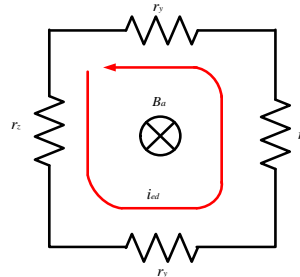


図4 (a) 渦電流による反作用磁界を考慮した磁気回路



(b) 渦電流と電気回路

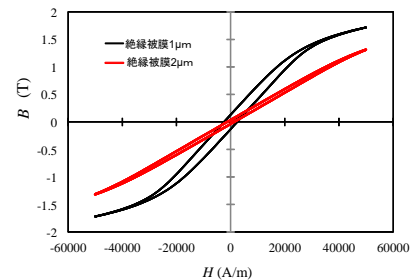


図5. 圧粉一粒子の交流磁気特性

第3章では、圧粉磁心で作製した環状鉄心の電気・磁気回路網モデルを構築し、渦電流損失の計算を行うとともに実測値との比較を行った。環状鉄心の寸法は図6に示した通りであり、磁性粉の粒径は  $45[\mu\text{m}]$ ,  $100[\mu\text{m}]$ ,

150[ $\mu\text{m}$ ]の3種類とする。計算においては、図6に示すように、中心角 $\theta=1^\circ$ で解析領域を切り出し、図7(a)に示すように、この解析領域の断面を $15\times 15$ の小領域に分割する。さらに分割した小領域の1領域を、図7(b)に示すように、 $15\times 15$ の要素に分割した。圧粉磁心の渦電流損失は、圧粉一粒子内に発生する粒子内渦電流損失( $W_{intra}$ )と、加圧成形・熱処理の過程で粒子間の絶縁が劣化し、粒子間に渦電流が発生することによる粒子間渦電流損失( $W_{inter}$ )に分けられる。ここでは図7(c)に示すように、粒子内渦電流は分割した要素内を流れる電流、粒子間渦電流は分割した要素間を流れる電流として計算した。このような渦電流の計算を、図7(a)の解析領域全体の要素と小領域において実施し、得られる要素内渦電流と鉄粉の抵抗値から粒子内渦電流損失、要素間渦電流と絶縁層の実効抵抗値から粒子間渦電流損失を算定した。この損失を360倍すれば環状鉄心全体の渦電流損失となる。

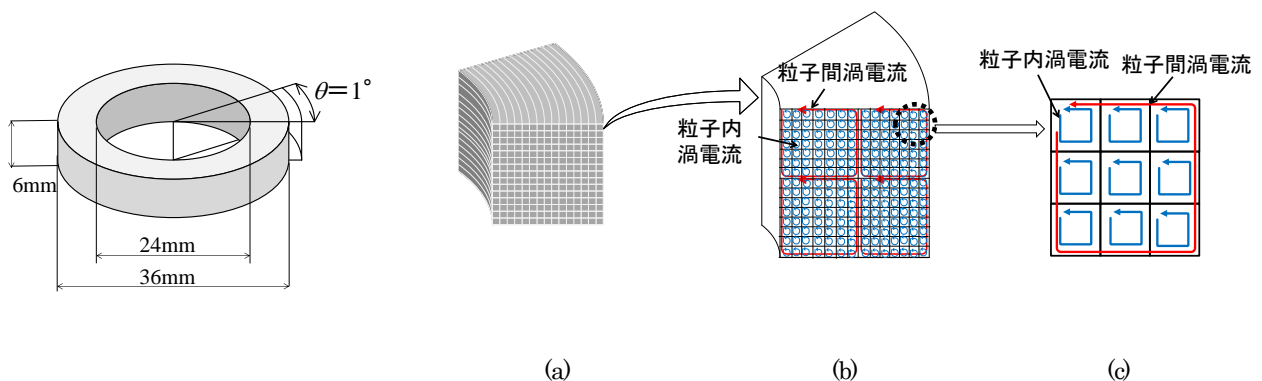


図6 計算と実測に用いた環状鉄心

図7 解析領域の要素分割と粒子内および粒子間渦電流

つぎに、計算で用いた環状鉄心と同形状の試料を作製し渦電流損失を測定した。図8の実線は、粒子内渦電流損失の計算結果、シンボルは測定結果である。これを見ると、計算値と実測値に差異が認められる。図9は、粒子内渦電流損失に粒子間渦電流損失を加えたものである。同図より、粒子間渦電流損失を考慮することにより渦電流損失を精度良く計算できることがわかる。以上、第3章では粒子内渦電流と粒子間渦電流を定量的に計算する手法を提案した。

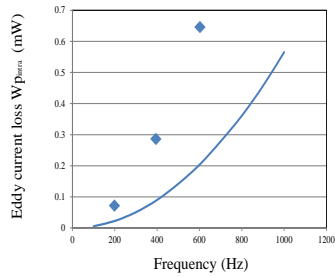


図8  $W_{intra}$  と実測値の比較

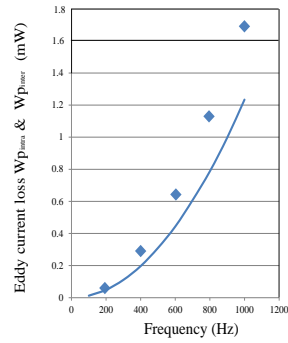


図9  $W_{intra} + W_{inter}$  と実測値の比較

第4章では、リアクトルコアを用いて、第3章の環状鉄心と同様に渦電流損失の計算と実測との比較を行った。

リアクトルは図10に示すように4ヶ所に空隙を持つ構造である。環状鉄心の計算と同様に断面を分割し、粒子内と粒子間渦電流を反作用磁界として磁気回路に挿入した。計算に用いた電気・磁気回路網モデルを図11に、計算結果を図12に示す。図中の実線は、粒子内と粒子間渦電流損失の合計である。シンボルは実測値であり、計算結果と良好な一致を示すことがわかる。

以上、本研究では圧粉磁心の一粒子モデルから  $B-H$  曲線や渦電流損失係数が計算可能なこと、それらを環状鉄心やリアクトルなどの磁気デバイス性能評価に適用可能であること、これまで定性的に説明されていた粒子内渦電流と粒子間渦電流が、電気・磁気回路網モデルによって定量的に解析できることを明らかにした。これらの成果は、圧粉磁心一粒子の磁気特性、磁性体粒径、絶縁被膜厚さ、絶縁被膜の抵抗などを考慮した磁気デバイスの定量評価を可能にするものである。

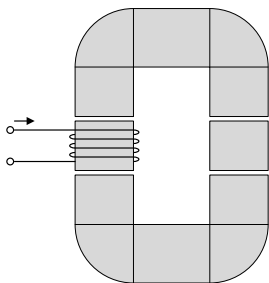


図10 リアクトル形状

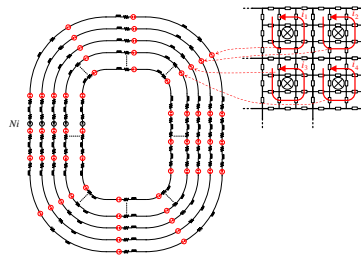


図11 粒子間渦電流を考慮した電気・磁気回路

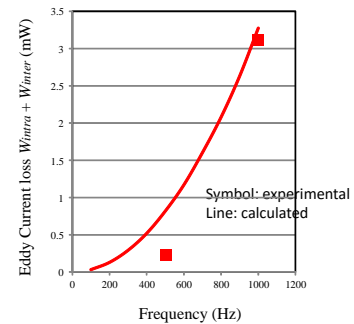


図12  $W_{intra} + W_{inter}$  と実測値の比較

# 論文審査結果の要旨

純鉄や鉄系合金の磁性粉末で作製される圧粉磁心は、高周波領域におけるうず電流損失が小さいこと、飽和磁束密度が高いこと、磁気特性が三次元的に等方であること、形状の自由度が高いことなどの特長を有するため、モータやリアクトルへの適用が進められ、一部実用化されている。しかし、圧粉磁心は磁性粉と絶縁層で構成される特殊な構造のため、定量的な解析手法が確立されておらず、実験的に導かれた指針に基づいてデバイス設計を行っているのが現状である。本論文は、圧粉磁心の定量的な解析手法の構築を目的として、磁気回路法に基づく圧粉磁心の解析モデルを提案し、環状鉄心や空隙付きリアクトルの特性算定に適用したもので、全編5章からなる。

第1章は緒言であり、本論文の背景および目的を述べている。

第2章では、磁気回路法の基本事項について説明し、3章以降の考察に必要な圧粉磁心一粒子の解析モデルを導出している。まず、加圧成形・熱処理後の磁性粉の断面形状が矩形に近いことに着目し、圧粉磁心一粒子を立方体と仮定して磁気回路モデルを導出している。これに基づき、磁性粉として純鉄を用いた場合の圧粉磁心一粒子のB-H特性を算出し、純鉄の非線形磁化特性を良好に再現できること、圧粉磁心の絶縁層も含めた磁気特性が容易に計算できることを明らかにしている。ついで、一粒子を15×15分割し、これらの領域を通過する磁束を計算するための磁気回路網と、通過磁束に基づいてうず電流を計算するための電気回路網を導出し、両者を結合させることによってうず電流分布を考慮した解析が可能な電気・磁気回路網モデルを構築している。さらに、粒径45 μm, 100 μm, 150 μmの純鉄の磁性粉で棒状の圧粉磁心を作製し、その体積密度から圧粉磁心の占積率と平均被膜厚さを求めるとともに、これを適用した電気・磁気回路網モデルに基づいてうず電流損失係数を算出している。これは、圧粉磁心を用いた磁気デバイスの解析の基礎となる重要な成果である。

第3章では、圧粉磁心で作製した環状鉄心の電気・磁気回路網モデルを構築し、2章で求めたB-H特性とうず電流損失係数を適用して環状鉄心の磁束密度分布とうず電流損失の算定を行っている。圧粉磁心では、粒子内を流れるうず電流と粒子間を流れるうず電流が存在することが知られている。ここでは、電気・磁気回路網に粒子間の絶縁劣化を想定したうず電流の経路を追加することによって、粒子間うず電流も計算可能なモデルを構築している。さらに、計算に用いた形状と同一の試料を製作し、うず電流損失の実測値と計算値が良好な一致を示すことを明らかにしている。これは、提案手法によって圧粉磁心を用いた磁気デバイスの定量的な解析が可能であることを実証するもので高く評価される。

第4章では、圧粉磁心を用いた昇圧コンバータ用リアクトルのうず電流損失解析について述べている。リアクトルは4か所の空隙を有するC形コアで構成されるものとし、3章と同様の手法でリアクトルの電気・磁気回路網モデルを導出するとともに、計算に用いたリアクトルと同一形状の圧粉磁心リアクトルを製作している。電気・磁気回路網モデルによるうず電流損失の計算値と実測値は良好な一致を示すことから、提案手法が圧粉磁心で作製された複雑な形状の磁気デバイスの定量解析にも適用可能であることを述べている。さらに、粒径を小さくしていった場合には粒子間うず電流損失が支配的になるため、粒子間の絶縁確保が重要であることを指摘している。これは有用な知見である。

第5章は結言であり、各章の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、電気・磁気回路網による圧粉磁心の解析モデルを提案し、これに基づいて環状鉄心ならびに空隙付きリアクトルの磁気特性とうず電流損失の定量的な算定手法を与えたもので、磁気工学およびパワーエレクトロニクスの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。