

学 位 論 文 題 名

電磁界の時間応答解析手法による 磁性体損失のモデリングに関する研究

学位論文内容の要旨

磁性体の利用分野は極めて多岐にわたるが、近年著しい発展をとげている電子機器工学や電波応用工学の分野においても、その用途に合わせた性能の向上が強く求められている。たとえば、電子機器の大幅な小型、軽量、多機能化などにより、電子部品の一層の小型化、高周波化、高効率化が要求され、特に磁性体の損失低減は重要な課題となっている。また、電波吸収体に対しても、その薄型化が要求されるとともに、磁性体の損失特性の最適化が重要な課題になってきている。こうした磁性体の損失には、その磁化特性に由来するヒステリシス損失、磁性体の導電性に由来する渦電流損失、その他の残留損失があり、実際には、これらの損失が相互に影響し合って複雑な損失機構を形成していると考えられている。なかでも実用上重要なフェライトの磁化、損失機構は極めて複雑であり、磁気ヘッドやスイッチング電源用トランスのように損失が小さく透磁率が大きくなる周波数範囲で用いたり、逆に電波吸収体のように損失が大きくなる周波数範囲で利用したりするなど、その複雑な磁気特性をいかに効果的に活用するかが重要なポイントとなる。したがって、用途に合わせた素材の開発が重要で、フェライトに代表される磁性体の、とりわけ高周波における磁化ならびに損失機構の解明が重要な課題となっている。

さて、磁性体の損失を解析、評価するには、従来から磁性体をマクロな電磁気学的見地からとらえ、実験結果から個々の損失に対する実験式を求めて磁性体損失を分離する方法が多くとられてきた。しかしながらこのような方法では、ヒステリシス特性に代表される非線形性や渦電流の相互の影響による磁性体内部の磁界分布の状態を把握することは困難である。また、高周波における変位電流の影響を考慮することもできず、残留損失の定量的な評価も難しい。このように、高周波用磁性材料の各損失の相互影響を考慮した損失機構の解明は、まだ十分に行われていないのが実状である。

ところで、このような磁性材料を用いた製品開発を進める上で、その動作、磁束分布、損失分布などをあらかじめ予測し、最適形状を探索するための手段として電磁界の数値解析技術が重要な役割を果たしており、特に最近のコンピュータの急速な発達はその有効性を著しく高めてきている。こうした数値解析法は、その汎用性から磁性体の磁気損失機構そのものを究明するアプローチとしても有効な一手段になると考えられる。ただし、ヒステリシス特性のような非線形性、渦電流の影響、誘電率、高周波における変位電流の影響をすべて考慮しなければならないことから、数ある数値解析法の中でも、電磁界の全成分を用いた時間応答解析手法が、現時点では最適であると考えられる。

本研究は、こうした状況の下で、主に電磁界の時間応答解析手法の一つである空間回路

網法を用いて磁性体のヒステリシス特性、渦電流、共鳴現象をすべて考慮した定式化を行い、非線形性と損失を有する磁性体の電磁界解析に時間応答解析手法が極めて有効であることを示すとともに、その高周波損失機構を究明する上でもこの時間応答解析手法が有効な手段になりうることを実証したものである。具体的には、ヒステリシス特性と磁化の緩和特性を考慮した磁性体の空間回路網法に基づく等価回路モデル、ならびに実験から求めることのできる時間応答解析に適した厳密なヒステリシス特性モデルを考案し、これらのモデルを用いてフェライトのヒステリシス損失と渦電流損失を同時に考慮したときの電磁界解析を実施し、初めて両損失の相互影響による高周波特性の定量的評価を行っている。

本論文は、6章で構成されている。以下に、各章の概要を述べる。

第1章では、本研究の背景および目的、従来の関連する研究の概要、そして本論文の概要を述べた。

第2章では、ヒステリシス特性を有する磁性体の電磁界解析に空間回路網法を用いるときの基本的取扱いとその妥当性について述べた。解析モデルとして、折線近似されたヒステリシス特性を有する磁性体を充填した平行平板導波路を取り上げ、TEM波を入力したときの電磁界を計算し、電磁波の進行に伴う高調波成分の発生、実効透磁率の変化、さらにヒステリシス損失とポインティング電力の減衰の対応を示して、ヒステリシスを有する磁性体の時間軸上での逐次的取扱いの妥当性を明らかにした。

第3章では、ヒステリシス特性と磁化の緩和特性を組み合わせた磁性体の空間回路網法に基づく等価回路モデルを提案した。この等価回路モデルを薄型電波吸収体に適用し、平面波入射に対する反射係数の周波数特性を解析した。なお、ここでは折線近似されたヒステリシスモデルを仮定した。結果として、基本的な緩和のみのモデルで理論とよく一致することを示し、さらにヒステリシスも考慮することでヒステリシス損失による整合周波数以下での反射係数の低減が説明できること、また実験結果と整合周波数および周波数特性の傾向が一致することを示して、ここで考察した等価回路モデルの妥当性を明らかにした。

第4章では、より厳密にヒステリシス軌跡を計算するために、実測されたヒステリシス曲線群（メジャー LOOP と数本のマイナーループ）からマイナーループを含むなめらかなヒステリシス曲線を再現するヒステリシスモデルを提案した。このモデルでは、実測されたヒステリシス曲線群から、ヒステリシス曲線の微分係数である磁化率の分布を得て、これを基に磁界の変化に伴う磁化の変化を連続的に計算する。具体的に、減磁の過程におけるヒステリシスループを計算してその収束する様子を観測し、また実際の磁性体試料を用いてヒステリシスループの計算結果と実験結果を比較した。さらに、このモデルを用いた電磁界解析の妥当性を確認するため、パルス磁界を軸方向に対して垂直方向に加えたときの無限円柱状磁性体の内外における磁化と磁界の解析を空間回路網法とFDTD法を用いて行い、磁性体内部の磁化を求め、理論値との比較を行った。

第5章では、渦電流による表皮効果の計算結果から空間回路網法の厳密性、ならびにソレノイドの励磁電流の歪みの計算結果からヒステリシスモデルの厳密性を確認した上で、MnZnフェライトトロイダルコアの磁性体損失の周波数特性を解析した結果を示し、ヒステリシスによる透磁率の変化と渦電流による表皮効果が相互に影響を及ぼしあいながら、全体としての損失を構成していることを明らかにした。また、これら相互の影響を無視して個別に損失を求め、全損失から差し引くことで残留損失を算出する方法に比べて、より正確な残留損失の算出が可能となることを明らかにした。

第6章は、結論として論文全体を総括してまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 柴 正 則

副 査 教 授 伊 藤 精 彦

副 査 教 授 小 川 恭 孝

副 査 教 授 宮 永 喜 一

学 位 論 文 題 名

電磁界の時間応答解析手法による 磁性体損失のモデリングに関する研究

磁性体の利用分野は極めて多岐にわたるが、近年著しい発展をとげている電子機器工学や電波応用工学の分野においても、その用途に合わせた性能の向上が強く求められており、特に磁性体の低損失化、さらには損失特性の最適化が重要な課題になってきている。こうした磁性体の損失には、その磁化特性に起因するヒステリシス損失、磁性体の導電性に起因する渦電流損失、その他の残留損失があり、実際には、これらの損失が相互に影響し合って複雑な損失機構を形成していると考えられている。

ところで、磁性体の損失を解析、評価するには、従来から磁性体をマクロな電磁気学的見地からとらえ、実験結果から個々の損失に対する実験式を求めて磁性体損失を分離する方法が多くとられてきた。しかしながらこのような方法では、ヒステリシス特性に代表される非線形性や渦電流の相互の影響による磁性体内部の磁界分布の状態を把握することは困難である。また、高周波における変位電流の影響を考慮することもできず、残留損失の定量的な評価も難しい。このように、高周波用磁性材料の各損失の相互影響を考慮した損失機構の解明は、まだ十分に行われていないのが実状である。

本論文は、こうした状況の下で、電磁界の時間応答解析手法の一つである空間回路網法を用いて磁性体のヒステリシス特性、渦電流、共鳴現象をすべて考慮した定式化を行い、非線形性と損失を有する磁性体の電磁界解析に時間応答解析手法が極めて有効であることを示すとともに、その高周波損失機構を究明する上でもこの時間応答解析手法が有効な手段になりうることを実証したものである。具体的には、ヒステリシス特性と磁化の緩和特性を考慮した磁性体の空間回路網法に基づく等価回路モデル、ならびに実験から求めることのできる時間応答解析に適した厳密なヒステリシス特性モデルを考案し、これらのモデルを用いてフェライトのヒステリシス損失と渦電流損失を同時に考慮したときの電磁界解析を実施し、初めて両損失の相互影響による高周波特性の定量的評価を行っている。

以下に、本論文の構成を示す。

第1章では、本研究の背景および目的、従来の関連する研究の概要を述べた。

第2章では、ヒステリシス特性を有する磁性体の電磁界解析に空間回路網法を導入し、その基本的取扱いについて述べた。解析モデルとして、折線近似されたヒステリシス特性を有する磁性体を充填した平行平板導波路を取り上げ、電磁波の進行に伴う高調波成分の発生、実効透磁率の変化、さらにヒステリシス損失とポインティング電力の減衰との対応関係を明らかにした。

第3章では、ヒステリシス特性と磁化の緩和特性を組み合わせた磁性体の空間回路網法に基づく等価回路モデルを提案した。この等価回路モデルを薄型電波吸収体に適用し、平面波入射に対する反射係数の周波数特性を解析した。また、整合周波数および周波数特性の傾向が実験結果と一致することを示して、ここで考案した等価回路モデルの妥当性を明らかにした。

第4章では、より厳密にヒステリシス軌跡を計算するために、実測されたヒステリシス曲線群（メジャーループと数本のマイナーループ）からマイナーループを含むなめらかなヒステリシス曲線を再現するヒステリシスモデルを提案した。具体的に、減磁の過程におけるヒステリシスループを計算してその収束する様子を観測し、また実際の磁性体試料を用いてヒステリシスループの計算結果と実験結果を比較した。

第5章では、渦電流による表皮効果の計算結果から空間回路網法の厳密性、ならびにソレノイドの励磁電流の歪みの計算結果からヒステリシスモデルの厳密性を確認した上で、MnZnフェライトトロイダルコアの磁性体損失の周波数特性を解析した結果を示し、ヒステリシスによる透磁率の変化と渦電流による表皮効果が相互に影響を及ぼし合いながら、全体としての損失を構成していることを明らかにした。

第6章は、結論として論文全体を総括してまとめた。

これを要するに、著者は、非線形性と損失を有する磁性体の高周波特性解析に電磁界の時間応答解析手法を初めて導入し、磁性体損失の新しいモデリング法を提案するとともに、高周波損失機構の解明に関する有益な知見を得たものであり、電波エレクトロニクスの分野に貢献するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。