

機関番号：12501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560260

研究課題名（和文） 電源設計高精度化支援のための非線形損失空間分布を捉えた磁気デバイスモデルの開発

研究課題名（英文） Magnetic Device Development for High Quality Power Supply, Taking into Account the Non-Linear Loss Distribution in the Core

研究代表者

早乙女 英夫（SAOTOME HIDEO）

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50261938

研究成果の概要（和文）：電源設計高度化のためには、いくつかの課題がある。そのうちの一つに、インダクタやトランスなどの磁気デバイスの適用法の検討がある。磁気デバイスをより発展的に活用するには、その物理的振る舞いを定量的に把握することが重要である。本研究では、高周波磁気デバイスのコア材料として適用されるフェライトの高周波磁気特性を明らかにし、電源装置開発者にとって使い勝手の良い磁気デバイスの物理モデルを開発することができた。

研究成果の概要（英文）：To develop high quality power supply, we have to overcome some difficulties. Magnetic devices such as inductors and transformers are key devices for the development. To apply magnetic devices more actively to power supplies, we have to study their physical performance deeply. In this study, the magnetic properties of ferrite, used for the core of magnetic devices, are clarified and the physical model describing the properties has been developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：フェライト，鉄損，電源，電磁界解析，非線形

## 1. 研究開始当初の背景

概ね 10 年程前までのフェライトの損失評価は、磁気ヒステリシス損失に渦電流に起因する損失が加わることを前提として研究が成されていたが、この手法によって計算された損失値は実測値と桁違いであるため、実測値との差を「残留損失」と呼称せざるを得ず、その実態の究明が求められていた。この「残留損失」の周波数特性を抛り所に「異常渦電流」を仮定した解析が提案されていたが、その実態が具体化されることはなかった。この従来手法は、フェライトコアの「残留損失」の周波数特性実測値にフィットする周波数

の階乗の次数を整数に限らず実数で表す手法であり、フェライト内の電磁界分布などの物理的特性には一切触れないものであった。

本研究代表者は、1996 年ころから正弦波小振幅励磁の条件化であるが、フェライトコア内の電磁界分布解析をベースとした「残留損失」の解析を行い、これが「動的磁気損失」と「等価誘電損失」に分離されることを定量的に明らかにした。ここでは、コアの寸法に依らない材料パラメータである「動的損失パラメータ」を導出した。一方、本研究代表者による等価誘電損失を考慮した研究から数年遅れて、フランスのグルノーブル電気研究

所からフェライトの誘電特性に着目した損失解析の論文が発表された。また、本研究代表者の解析モデルの流れを受け、シンガポールのナンヤン工科大学による有限要素法解析が発表された。さらには、今年（2007年）には、米国のIBMから、やはりフェライトの誘電特性を考慮した論文も発表された。我が国においては、有限要素法ではなく、空間回路網法によるフェライトコア内の電磁界解析を行う手法も発表されている。

## 2. 研究の目的

- (1) フェライトコアの励磁磁束波形を正弦波だけではなく、DC-DCコンバータ適用時と同様の方形波または任意波形電圧にて励磁を行い、これらの条件化において、「磁気損失パラメータ」を定量的に求める。
- (2) 回路シミュレーションにおいてDC-DCコンバータ回路と直接接続できる、フェライトの磁気飽和による非線形磁化特性および誘電的特性を盛り込んだフェライトコアの電磁界解析モデルを開発する。これにより、DC-DCコンバータ回路と磁気デバイス内のダイナミック（動的）な電磁界分布とを連成した全体システムの解析が可能となる。
- (3) 仕様の異なるDC-DCコンバータの実機を複数台製作し、また、複数のフェライト材に対して上記(1)および(2)を遂行して解析手法の汎用化を図り、実機による実験値と開発モデルによるシミュレーション結果との突合せから、開発モデルの高精度化を実現する。

## 3. 研究の方法

- (1) 方形波および任意の電圧波形をフェライトコアの巻線に印加し、それらの条件下におけるフェライトの磁化特性を測定するために必要な電圧信号発生装置を製作する。本電圧信号発生装置には、B-H磁化特性のマイナーループを描ける機能を設ける。
- (2) フェライトコアの磁化特性を測定するための計測システムを構築する。具体的には、高周波電流計測用シャント抵抗の内部インピーダンスの補償方法を確率し、また、測定器電源をコアの励磁電源から絶縁するための絶縁電源を製作する。
- (3) フェライトコアの励磁装置および磁化特性の計測システムを完成させたのち、複数のフェライト材に対してそれらの磁化特性を計測し、動的磁気損失パラメータを代表とする物理パラメータを定量的に求める。動的磁気損失パラメータは、磁束密度の時間微分  $dB/dt$  の関数として求め、各フェライトの非線形磁化特性を把握する。このとき、磁気飽和および磁気ヒステリシスに起因する磁化特性に関しては、これらの特性を定量的にモデル化した算出式を適用する。高周波励磁電流から低周波での磁気ヒステリシスに伴う

電流を分離し、高周波励磁で特に顕著となる動的磁気損失およびその発生に起因する励磁電流部を抽出する。

(4) フェライトの高周波非線形磁化特性を盛り込んだ回路モデルを開発する。

## 4. 研究成果

(1) フェライトコア内の電磁界解析を行うにあたり、回路技術者が扱いやすい回路モデルを開発する必要がある。まず、図1に示す回路を開発し、その有効性の検証をフェライトが磁気飽和しない線形領域で行った。図2に示すようなトロイダル形状のフェライトコアを用い、その断面を図3のように細分化する。各細分化された口型の要素に渦電流を仮定すると、図1の回路となる。図1の回路に示された抵抗器は損失を発生し、回路位置により、磁気損失  $P_M$ 、渦電流損失  $P_E$ 、等価変位電流損失  $P_D$  に分離される。これらの損失および総和  $P$  の周波数特性を実測値との検証

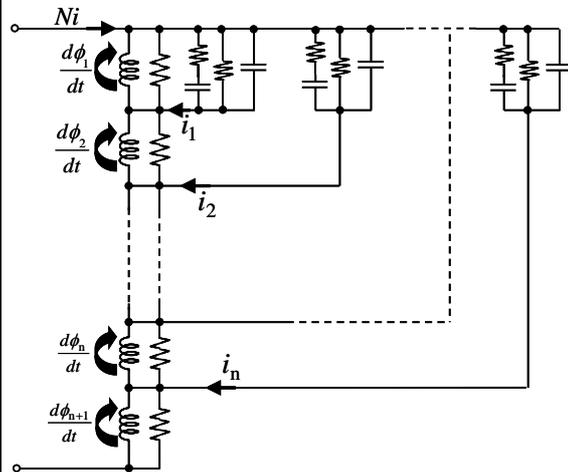


図1

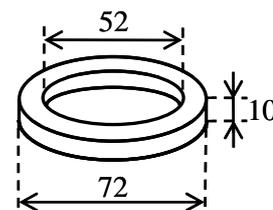


図2（寸法単位 mm）

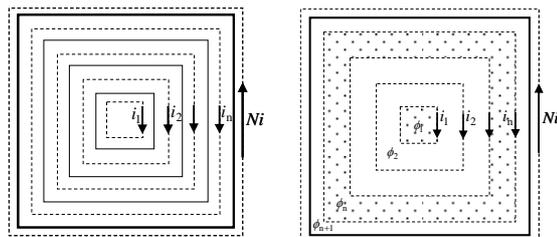


図3

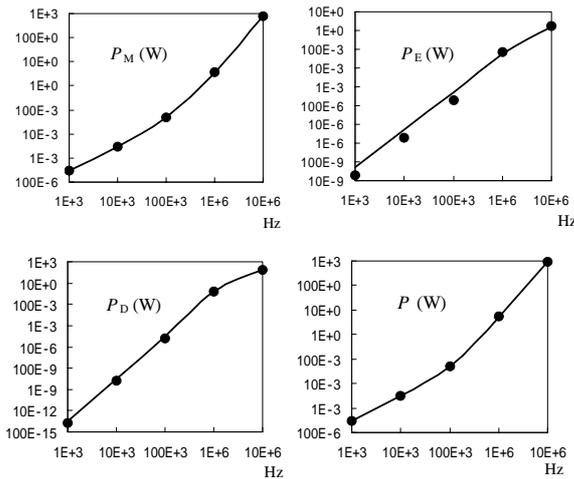


図 4

が確認済みの有限要素法による結果と比較した(図4)。図4では、実線が有限要素法による値、が図1のモデルを適用した値で、両者は概ね一致していることが分かる。以上により、図1の回路モデルの妥当性を確認した。

(2)非線形領域におけるフェライトの低周波磁気特性の把握とその数学モデルの開発を行った。周波数 1kHz の正弦波電圧で励磁したフェライトコアの B-H 特性(実測値)を図5に示す。この特性を微分透磁率を適用して模擬した結果を図6に示す。ここで微分透磁率は、B-H ループの最大磁束密度と軌跡上の磁束密度の関数とした。図5に対し、図6はほぼ一致し、微分透磁率による B-H 特性の表現法の有効性を確認した。

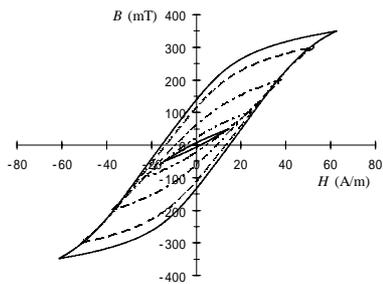


図 5

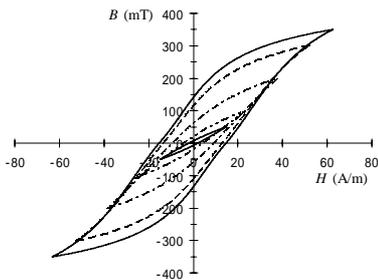


図 6

(3)非線形領域におけるフェライトの高周波磁気特性の把握とその数学モデルの開発を行った。高周波領域の磁化特性、特に損失特性を表現するため、動的磁気損失パラメータ  $f$  を導入した。一定電圧で周波数を大きくした場合、 $f$  が小さくなるほど、高周波での磁気損失は大きくなる。研究期間に行った  $f$  の同定試験では、励磁周波数ではなく、磁束密度の時間微分  $dB/dt$  に対する  $f$  の変化を測定した。その結果を図7に示す。図7の実線は測定点の平均を示している。尚、この測定試験は、常温で行った。

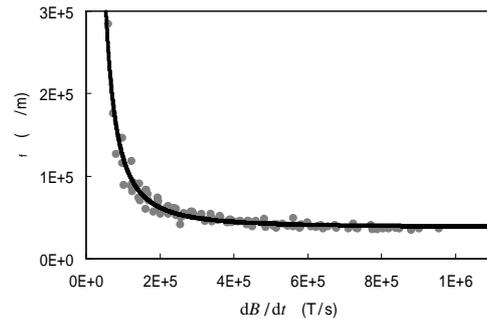


図 7

(4)上記の成果を統合し、フェライトコアの非線形高周波磁化特性を表現する物理モデルを開発した。図8および図9は、100kHz および 250kHz の正弦波電圧でフェライトコアを励磁したときの B-H 特性であり、実線および破線はそれぞれ実測値および図7に実線で示した  $f$  -  $dB/dt$  特性を適用したシミュレーション結果である。また、図10は、図3に示したコア断面内の B-H ループであり、断面中心に近いほど磁束密度および磁界が強くなるようすを表わしている。また、コア内

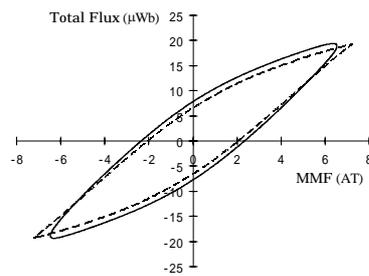


図 8

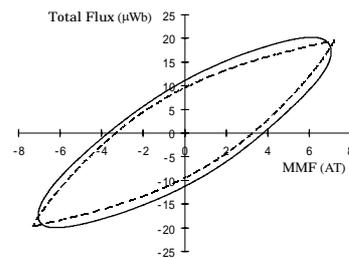


図 9

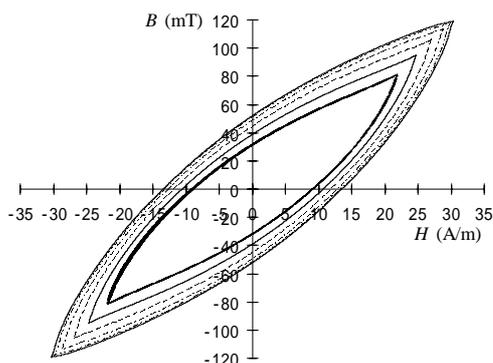


図 10

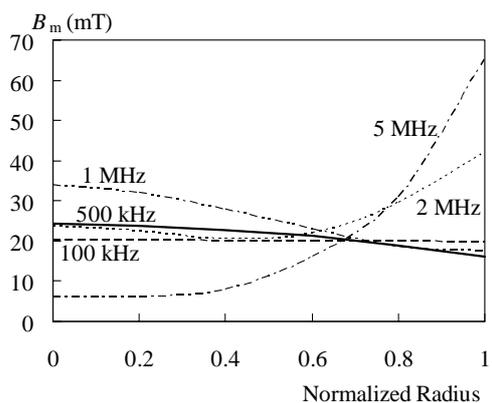


図 11

の磁束分布の周波数特性を解析した結果を図 11 に示す。図 11 の横軸はコア断面の中心からの距離を示しており、周波数が高くなるとコア内磁束分布が均一ではなくなることが分かる。

#### 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4件)

海野洋, 早乙女英夫: ハイブリッド型 DC-DC コンバータの出力リップル電流を低減させるトランス設計条件, J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 34, No. 6, pp. 599-605 (2010), 査読有  
 早乙女英夫, 宮崎麻衣: 高周波大振幅励磁における Mn-Zn フェライトコア内部の磁化特性解析, J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 34, No. 3, pp. 374-379 (2010), 査読有  
 海野洋, 渡辺晴夫, 早乙女英夫, 若月嘉真: ハイブリッド型 DC/DC コンバータに適用する四脚トランスの設計法, 日本磁気学会誌, Vol. 33, No. 1, pp. 21-27 (2009), 査読有

Hideo Saotome, Mai Miyazaki: Loss Analysis of a Mn-Zn Ferrite Core with the Spatial Network Method Taking the Dynamic Magnetic Loss into Account,

IEEJ Trans. FM, Vol. 128, No. 8, pp. 557-558 (2008), 査読有

[学会発表](計2件)

原昌之, 早乙女英夫: 正負パルス電圧による  $f - dB/dt$  特性の測定, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-10-133, 2010年11月1日発表, 神奈川県箱根町

海野洋, 早乙女英夫: ハイブリッド型 DC-DC コンバータの出力電流リップル低減に関する検討, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-09-140, 2009年10月30日発表, 奈良県奈良市

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等なし

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

早乙女 英夫 (SAOTOME HIDEO)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50261938

(2) 研究分担者

なし ( )

(3) 連携研究者

なし ( )