

平面インダクターの設計に関する考察

鳴田 知和 遠藤 久 早野 誠治 斎藤 兆古
法政大学工学部電気電子工学科

数値シミュレーションの結果から、反磁界係数が小さいコア形状では磁性体コアの周波数特性がインダクターの特性に直接反映し、反磁界係数が大きい薄型の場合、磁性体コアの周波数特性の影響が低下し、インダクタンスが減少することを報告する。

1. はじめに

近年の電気・電子機器は小型軽量化が重要な設計指針となっている。特に、ノートパソコンやワープロ等の携帯用電子機器は、単純な小型軽量化のみならず、薄型化が商品性を確保する重要な要素となっている。半導体素子を高度に集積した信号処理部分はフィルム基板上へ配置することで薄型化が実現されている。しかし、信号処理部分へ電力を供給する電源は、磁束と電流が必ず直交する性質から、完全な平面化は不可能である。特に電力を伝送するトランスやインダクターは磁路を形成する磁性体が、重量面だけでなく、形状に対しても薄型化を困難とする。

本論文は、このような磁気素子の薄型化を究極の目的とし、開領域を勘案した有限要素法を用いて平面型インダクターの最適設計に関して検討するものである。より具体的には、製造工程の簡略化等を前提として、軸対称の平面状コイル配置を持つ内鉄型インダクターについて、コア材料の周波数特性と実現されるインダクターの周波数特性に関して数値実験から考察する。また、数値実験の方法として、開領域を勘案した有限要素法による磁界分布解析を行う。有限要素法は境界条件を明確に規定された閉領域問題を前提としているため、インダクターの磁界分布解析のような開領域問題に対して、厳密な導入は困難である。この問題を解決するために電気映像法を拡張した双対映像法 (Strategic Dual Image Method)^{[2][3]}を用いて、開領域問題の有限要素解を得る。さらに、平面インダクターのコアを構成する磁性体の磁化特性を Chua 型磁化特性モデルで導入する。^{[4][5]}シミュレーション結果から、反磁界係数が小さいコア形状では磁性体コアの周波数特性がインダクターの特性に直接反映し、反磁界係数が大きい薄型の場合、磁性体コアの周波数特性の影響が低下し、インダクタンスが減少することを報告する。

2. 平面インダクターのモデリング

2.1 双対映像法

図 1 に示すように、有限要素法で離散化して得られた任意の節点に集中された電流 i を考える。この電流に対して、原点から距離 d の位置に $-(d/a)i$ のイメージ電流を想定すると図 1 (a) に示すように電流 i を取り囲む円 / 球上で、ベクトルポテンシャル \mathbf{A} はゼロとなる。従って、この円 / 球上で、半径方向の磁束密度は $\partial\mathbf{A}/\partial t = 0$ であるためゼロとなる。よって電流 i を取

り囲む半径 a の円 / 球上でゼロ境界条件 $\mathbf{A} = 0$ を設定することで、開領域フィールドの回転方向成分を求める。問題空間中の他の電流に対しても、原点 o と半径 a の円 / 球上仮想境界が共通となるようにイメージ電流を想定すれば分布した電流に対しても回転方向成分を表すベクトルポテンシャルを求めることができる。

工学、理学で遭遇する問題は、大部分の場合、系全としての電流はゼロ。すなわち、 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ を満足する。仮想境界の外側にあるイメージ電流の総和もゼロになることを意味する。これらを満足する条件は (1) 式となる。

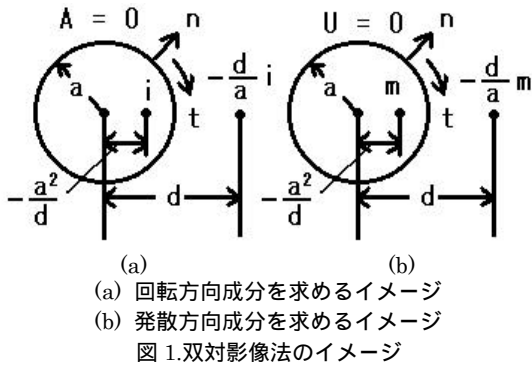
$$a \sum_{p=1}^q (i_p / r_p) = 0. \quad (1)$$

ここで、 q は電流の総数を表し、 d_p は i_p の電流に対するイメージ電流の位置、さらに r_p は原点 o から電流 i_p 間での距離を表す。(1)式の条件は、原点 o でベクトルポテンシャル \mathbf{A} がゼロとなることを意味する。

次に磁界源として、電流 i の代わりに磁荷 m を図 1 (b) に示すように考える。この磁荷 m に対して、原点から距離 d の位置 $-(d/a)m$ のイメージ磁荷を想定すると、図 1 (b) に示すように磁荷 m を取り囲む円 / 球上で、スカラーポテンシャル U はゼロとなる。従って、半径 a の円 / 球状仮想境界上で、回転方向の磁界は $\partial U / \partial t = 0$ であるため、ゼロとなる。この円 / 球状仮想境界上の境界条件 $U = 0$ をベクトルポテンシャルで表すと、 $\partial\mathbf{A} / \partial n = 0$ の対称境界条件に対応する。よって、電流 i を取り囲む半径 a の円 / 球上において対称境界条件 $\partial\mathbf{A} / \partial n = 0$ を設定することで、開領域フィールドの発散成分を求めることができる。

開領域問題は支配方程式の基本解であるグリーン関数を用いた積分方程式法で解くのが常套手段である。しかしながら、本論文では、開境界の解を対称境界条件の解とゼロ境界条件の解の合成で表現する双対映像法 (Strategic Dual Image Method) を適用する^{[2][3]}。以上の双対映像法を用いれば、グリーン関数を仮定する必要無く、有限要素法や差分法で開境界問題が解析可能となる。すなわち、磁性体の非線形性を勘案した解析も可能となる。

平面インダクターは円筒座標系の軸対称モデルで表現できる。軸対称モデルでは、対称境界条件とゼロ境界条件を設定する仮想境界は軸比 (長軸 / 短軸) = 1.815 の値を持つ楕円形となる^[4]。対称境界条件とゼ



口境界条件のシステム方程式を連立して解くことで開境界軸対象問題を有限要素法で解くことができる。

2.2. 線形化 Chua 型磁化特性モデル

磁性体の磁化特性モデルとして、Chua 型磁化特性モデルを採用する。Chua 型モデルは 3 個のパラメータで構成されており、透磁率を μ [H/m]、可逆透磁率を μ_r [H/m]、さらにヒステリシス係数を s [/m] である。すなわち、Chua 型磁化特性モデルによって、磁性体の磁化特性は、(2) 式のように表せる。

$$\mathbf{H} = \frac{1}{i} \mathbf{B} + \frac{1}{s} \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - i \hat{n} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \right) \quad (2)$$

(2) 式はベクトルポテンシャル $\hat{\mathbf{A}}$ を用いて (3) 式に変形することができる。

$$\left(\frac{1}{i} + \frac{1}{s} \frac{\partial}{\partial t} \right) \hat{\mathbf{A}} - \hat{e} \left(1 + \frac{\mu_r}{s} \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial}{\partial t} \hat{\mathbf{A}} = - \left(1 + \frac{i_r}{s} \frac{\partial}{\partial t} \right) \mathbf{J} \quad (3)$$

高周波で動作する磁気素子は、比較的低磁束密度領域で動作する。このため、正弦波状に励振された磁界 \mathbf{H} に対して、磁束密度 \mathbf{B} も正弦波状に変化し、線形な動作となる。このような線形動作において、ヒステリシスループは楕円ループとなり、磁気飽和を無視することができる。本論文では、パラメータ μ , μ_r , s を一定値とする線形化 Chua 型磁化特性モデルを用いて楕円ヒステリシスループを表現する。複素記号法 ($\partial / \partial t = j\omega$) を用いて Chua 型モデルから導かれる複素透磁率 $\mu(\omega)$ は(4) 式となる。

$$i(\omega) = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} = \frac{i(s^2 + \omega^2 \hat{i}_r)}{s^2 + \omega^2 i^2} - j \frac{\omega s (i - i_r)}{s^2 + \omega^2 i^2} \quad (4)$$

2.3. 平面インダクターの形状

図 2(a) に平面インダクターの形状を示す。図 2 (b) は採用

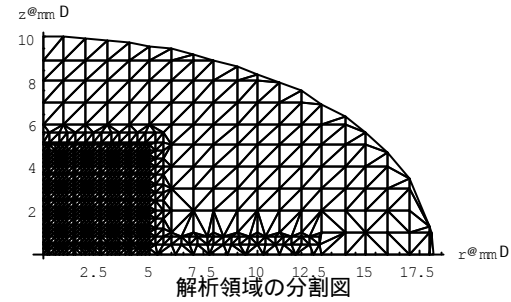
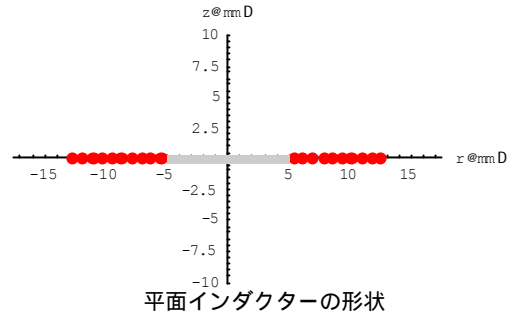


図 2 . 平面インダクターの形状と解析領域の分割図

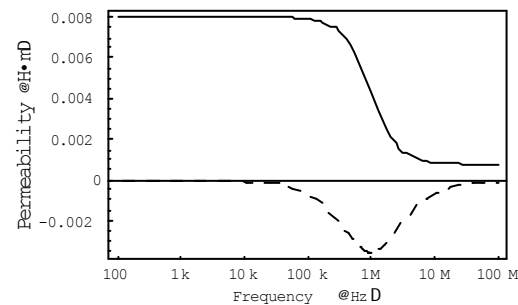
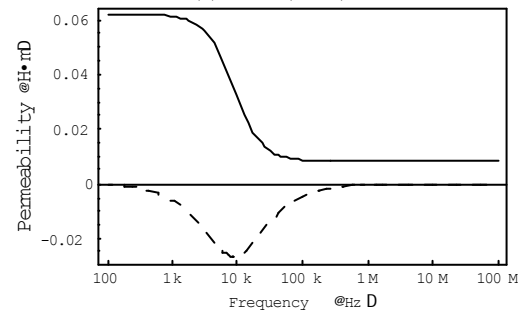
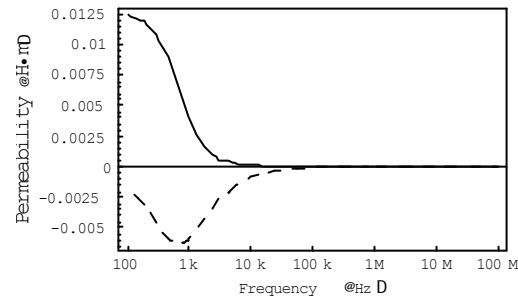


図 3 . 複素透磁率の周波数特性 (実線:実数部, 破線:虚数部)

した有限要素メッシュである。図 2 (a) に示す平面インダクターは中心にフェライトコア、コア周辺をコイルで巻く形状である。

シミュレーションでは Mn-Zn 系フェライトコア、H5c2 (TDK)、H5A (TDK)、3S1 (Phillips) を用いた。Mn-Zn 系フェライトは高透磁率、高磁束密度といった特徴を有する。H5c2、H5A、3S1、それぞれの線形化 Chua 型磁化特性モデルのパラメータを表 1 に示す。図 3 は、それぞれの複素透磁率の周波数特性である。また、導電率は共通で 1.0s/m と仮定する。数値シミュレーションは 100Hz から 100MHz の周波数帯域で行う。

平面インダクターをインダクタンスで評価する。インダクタンスは大きく 2 種類に分類することができる。一方は実数部であり、インダクターとして機能する磁気エネルギーを蓄積する部分である。他方は虚数部であり、インダクターの損失、渦電流損と鉄損の和を表す部分である。

2.4. 平面インダクターの周波数特性

図 4 は H5c2 をコア材とした場合のインダクタンスの実数部と虚数部を示す。コアの厚みが減少するに従い、インダクタンスの実数部は劇的に減少する。他方、虚数部はコアの厚みに対して、100kHz 付近の変曲点で大きく変化する。

図 5 は H5A をコア材とした場合のインダクタンスの実数部と虚数部を示す。コアの厚みが減少するに従い、インダクタンスの実数部は H5c2 をコア材とした場合よりもさらに劇的に減少する。虚数部はコアの厚みに対して、100kHz 付近の変曲点で大きく変化し、図 4 の虚数部と類似した結果となる。

図 6 は 3S1 をコア材とした場合のインダクタンスの実数部と虚数部を示す。その周波数特性は概ね H5A をコア材とした場合と一致する。

3. まとめ

現在、薄型の電源用磁気素子が開発されている。本論文では、平面インダクターに関する数値シミュレーションを行った。平面インダクターは開磁路を有するため、開領域問題を有限要素法で厳密に解くことを可能とする双対映像法を導入した。さらに、コア磁性材料の磁化特性を導入するために、線形化 Chua 型磁化特性モデルを導入した。

その結果、平面インダクターの周波数 - インダクタンス特性はフェライトコアの幾何学的形状とコアの周波数特性を連立して考慮した設計が必要であることが判明した。

参考文献

- [1] T.Naruta, S.Hayano, Y.Saito, "Wavelet Analysis of Optimization Problems-Designing of a flat shape magnetic sensor-" 可視化情報学会, Jul.2000.
- [2] Y.Saito, Y.Nakazawa and S.Hayano, "Faster open boundary magnetic field computation using the strategic dual Image
- [3] and Voronoi-Delaunay transformation methods", Journal of Applied Physics, Vol.67, No.9, May, 1990.
- [4] Y.Saito, K.Takahashi and S.Hayano, "Finite element solution of unbounded magnetic field problem containing ferromagnetic materials", IEEE Transaction on Magnetics, Vol.MAG-24, No.6, Nov.,1988.
- [5] S.Hayano, I.Marinova and Y.Saito, "New complex permeability measurement device for thin magnetic films," Journal of Applied Physics, Vol.75, No.10, May, 1994, pp.6887-6889.
- [6] Y.Saito, Y.Nakazawa and S.Hayano, Faster open boundary magnetic field computation using the strategic dual image and Voronoi-Delaunay transformation methods, Journal of Applied Physics, Vol.67, No.9, May, 1990.
- [7] S.Hayano, Y.Saito, and Y.Sakaki, A magnetization model for computational magneto dynamics, Journal of Applied Physics, Vol.29, No.28, pp.4614-4616, Apr., 1991.
- [8] K.Ohta, Introduction to magnetic engineering I, Kyoritsu shuppan (in Japanese), Tokyo (1984)

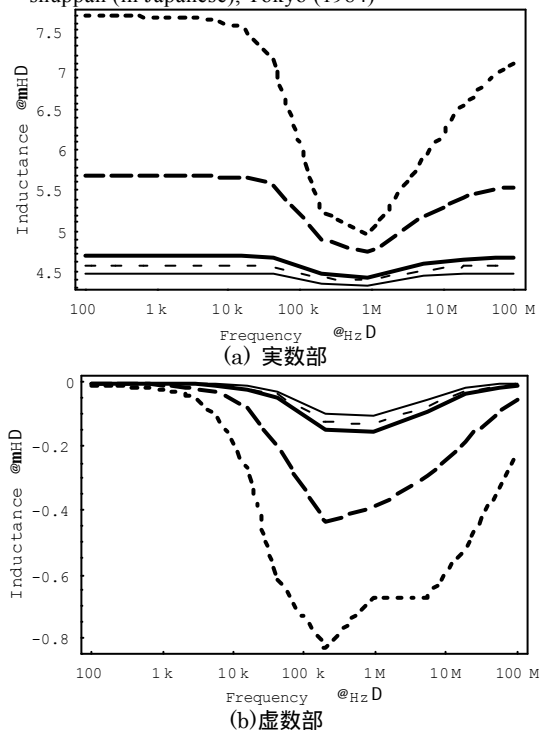
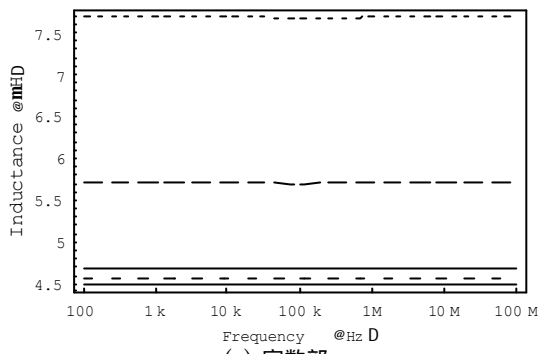
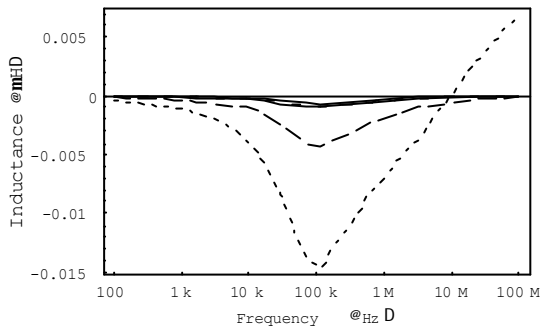


図 4. H5c2 による平面型インダクターの周波数特性

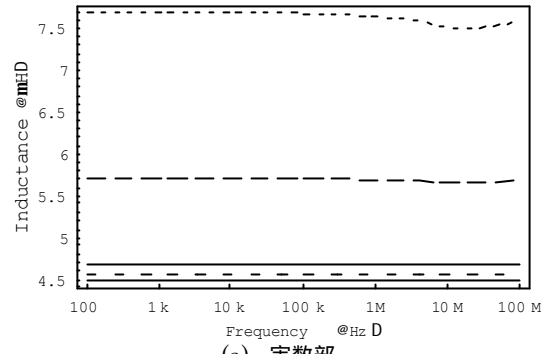


(a) 実数部

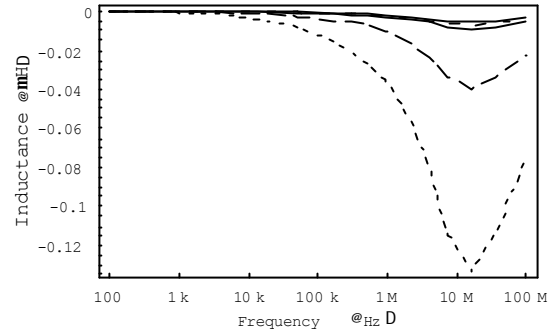


(b) 虚数部

図 5. H5A による平面型インダクタ - の周波数特性

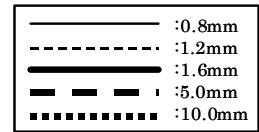


(a) 実数部



(b) 虚数部

(b) 図 6. 3S1 による平面型インダクタ - の周波数特性
フェライトコアの厚さ



キーワード.

平面インダクター、磁界分布解析、有限要素法、双対映像法、Chua 型磁化特性モデル

Summary.

A study of Planar Inductor Design

Tomokazu Naruta Hisashi Endo Seiji Hayano Yoshifuru Saito
Department of Electrical and Electronic Engineering, Hosei
University

In order to design a planar inductor, this paper carries out several axisymmetrical magnetic field simulations fully taking the magnetic hysteretic properties of ferromagnetic core materials as well as open boundary condition into account.

Finite element method is applied to evaluating the magnetic fields, reactive and dissipative energies in a planar inductor. Because of the nature of magnetic fields, it is essentially taken into account the open boundary effects to evaluate the exact characteristics of planar inductor. Since the finite elements is one of the methodologies to solving for the partial differential equations, and then it has been difficult to take the open boundary effects into account. However, this paper removes this difficulty by employing the strategic dual image (SDI, in short) method. Another difficulty is caused by the hysteretic magnetization characteristics of magnetic core materials. Applying the Chua type magnetization model to represent the hysteretic property also removes this difficulty.

As a result, it is revealed that the frequency characteristic of core magnetic materials as well as shape dominate major characteristics of the magnetic fields, reactive and dissipative energies in the inductors..

Keywords.

Planar inductor, Magnetic fields, Finite element method, Strategic dual image method, Chua type model