# 法政大学学術機関リポジトリ

### HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-01

## ウェーブレット変換に拠る高精度磁束分布計 算

HAYANO, Seiji / SAITO, Yoshifuru / 早野, 誠治 / 斎藤, 兆 古 / 藪並, 隼人 / YABUNAMI, Hayato

(出版者 / Publisher)法政大学計算科学研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title) 法政大学計算科学研究センター研究報告 / Bulletin of Computational Science Research Center, Hosei University

(巻 / Volume) 16 (開始ページ / Start Page) 95 (終了ページ / End Page) 99 (発行年 / Year) 2003-03-20 (URL)

https://doi.org/10.15002/00024981

#### 藪並 隼人 早野 誠治 斎藤 兆古 法政大学工学部情報電気電子工学科

本論文は、有限要素法と磁気回路法の接点を見出し、磁気回路法で使われる技術者の経験的要素を有限 要素法へ導入して、実用的な電磁機器の設計へ寄与できる現代磁気回路理論を提案するものである。さ らに、この現代磁気回路理論による磁束分布にウェーブレット変換を適用した結果、ウェーブレット変 換は磁束分布を評価するために有用な方法であることを報告する。

#### 1. はじめに

近年のデジタル計算機の高性能化と小型化、なら びに低価格化はデジタル計算機の爆発的普及をもた らし、いわゆる、デジタル計算機がパーソナルコン ピュータ(Personal Computer,以下、PC と略記)と 呼ばれる高級・多機能文房具として使われるように なった。このため、有限要素法や境界要素法で代表 される電磁界の数値解析は、PC で実行可能な環境に なり、この意味で、既に数値解析の汎用パッケージ が販売されるに至っている[1,2]。しかしながら、現 実問題として、汎用パッケージで実用的な電磁機器 の解析が容易に行え、その結果が実際の設計へ反映 されているであろうか?答えは否である。実際は、 極めて単純な例を除き、定性的な電磁界分布の傾向 を把握する程度の実用性しか期待できない。この問 題点を踏まえ、実際の電磁機器の電磁界解析を行う 方法は以下に示す二方法が考えられる。第一は磁気 回路法である[3,4]。古典的な磁界分布解析の工学的 近似手法である磁気回路法は、平均的であれ、現実 の非線形磁気装置の解析を可能とし、装置の設計に 寄与している。磁気回路法は、技術者の経験的要素 に基づくため、その数学的根拠に疑問の余地がある。 しかし、実用的な結果を与える現実的方法である。 第二は有限要素法に代表される数値解析法である。 有限要素法などの数値解析法は、数学的根拠が明確 である反面、現実の設計に生かされにくい側面をも つ。筆者らは、このような現状を踏まえ、有限要素 法と古典的磁気回路法の接点を見出し、数学的背景 が明確な磁気回路法を確立する一方途、現代磁気回 路理論を提唱してきた。

本論文では、我々の提唱するこの現代磁気回路理 論による磁界分布にウェーブレット変換を適用した 結果、磁界分布を評価する上で有効な評価方法であ ることを報告する。

- 2.現代磁気回路理論
- 2.1.二次元現代磁気回路理論



(a)三角形一次有限要素法 (b)古典的磁気回路法 図1.有限要素法と古典的磁気回路法のメッシュシステム

まず、古典的磁気回路法を有限要素法で置き換える ことを考える。図1(b)は図1(a)の有限要素法の離散 化したメッシュを磁気回路で表現したものである。有 限要素法は、図1(a)に示すように各節点に電流が均等 に振り分けられているものとして、それぞれの節点に 対する磁束のループ方程式を解くことにより、各節点 ポテンシャルを求めることを意味する。それに対し、 古典的磁気回路法は図1(b)に示すように、一つの節点 ポテンシャルを取り囲む直列の磁気回路を解くこと により、その節点ポテンシャルを求めることを意味す る。

従って、古典的磁気回路方程式が三角形一次有限要 素法から導かれる。この考え方に基づき、数学的背景 が不明確な古典的磁気回路法を数学的背景が明確な 有限要素法で置き換えて解析する方法が、二次元の現 代磁気回路理論の基本的な原理である[5]。

#### 2.2.準三次元的な現代磁気回路理論

図 2 の左図に示す立方体形状において、左から右 方向に通る磁束は、図 2 の右図に示すように二次元 の平行面のスライスに分割した形状の磁気抵抗を考 えることにより、容易に計算することができる。こ れは最も簡単な場合であるが、この考え方を一般化 し、本論文で提唱する有限要素法に基づく現代磁気 回路理論は準三次元的な磁気回路へ一般化すること ができることは明らかであろう。



図7.台形全ての磁気抵抗

ここで、図3に示す中空部分を有する立体形状の磁 気回路を考える。まず、この立体形状は図4に示すよ うに4個の同一形状の台形に分割することができる。 さらに、図5に示すように分割された各々の台形を対 角線面に沿って2個の5面体に分割した後、それぞれ の5面体を水平方向に*m*個の平行面状スライスに分割 する。

 m個の平行面状スライスに分割された全体の磁気 抵抗、すなわち、図5の右側に示す5面体の水平方向 の磁気抵抗は、図6に示すようにm個の磁気抵抗を並 列接続することで計算される。(1)式は図6に示す合成 の磁気抵抗値を与える。

$$\frac{1}{R_{TOTAL}} = \sum_{i} \frac{1}{R_{i}}$$

$$= \sum_{i=1}^{m} \frac{\mu B \cdot C_{m}}{\frac{A - 2C}{2} + \left(\frac{A}{2} - \frac{A - 2C}{2}\right) \cdot (i - 1)_{m}}$$
(1)

(1)式で $m \rightarrow \infty$ , C = dx, 1 = xとすれば、リーマン積分の適用が可能となり、その結果、(2)式のように合成抵抗が計算される。

$$R_{TOTAL} = \frac{C}{\mu B \log\left(\frac{A - 2C + 2C^2}{A - 2C}\right)}$$
(2)

(2)式は4個に分割された台形をさらに2分割して得られた5面体の磁気抵抗である。したがって、台形全体としての磁気抵抗は(2)式の磁気抵抗を2個直列に接続したものである。すなわち、(3)式で与えられる。

$$R_{Whole-trapezoid} = \frac{2C}{\mu B \log\left(\frac{A - 2C + 2C^2}{A - 2C}\right)}$$
(3)

• ~

図7は(3)式の計算を図式的に示したものである。以 上のように、他の台形についても同様に磁気抵抗が計 算され、最終的に図3に示す中空部分を有する立体形 状の円周方向の全磁気抵抗は、(3)式の磁気抵抗を直列 に4個接続したものであり、(4)式で与えられる。

$$R_{Whole} = \frac{8C}{\mu B \log\left(\frac{A - 2C + 2C^2}{A - 2C}\right)}$$
(4)

ここまでで、図3に示すような中空四角形の磁気抵 抗を我々の提唱する現代磁気回路理論から求めた。こ こでは、中空四角形を中空*n*角形へ拡張する。

まず、図3,4 に示したように四角形の中空部分を 有する四角柱は4個の同一形状の台形に分割すること ができることより、中空n角形はn個の同一形状の台 形に分割できることは明らかである。

この n個の台形を、四角形の場合と同様に、対角線 面に沿って 2 個の 5 面体に分割し、それぞれの 5 面体 の磁気抵抗を計算する一般化式は(5)式となる。

$$R_{n-5} =$$



(5)式から、中空
$$n$$
角形の全磁気抵抗は(6)式となる。 $R_{n-total} = R_{n-5} \times 2 \times n$  (6)

#### 2.3. 中空 n角形の磁気抵抗の評価

ここで、(4)式から磁気抵抗の単位を考えると、磁気 抵抗の単位はインダクタンスの逆数、すなわち、1/H もしくは、A/Wb である。

ここでは、本論文で提唱する現代磁気回路理論によ る磁気抵抗から求まるインダクタンスと、解析的に求 まるインダクタンスを比較することにより、準三次元 磁気抵抗の評価を行う。

中空部分を有する立体形状において、外径 0.5m,高さ 1mで一定とし、内径を0.4mから0.01mまで変化し、 さらに、角数を4から512まで変化させた場合のイン ダクタンスの変化を図8に示す。

図 8 から、高さ 1m,外径 0.5m,内径 0.01m の中空 512 角形の時にインダクタンスは最大の 32.2541mH となることがわかる。また、外径 1m,内径 0.1m で、 角数の如何にかかわらず、インダクタンスはほぼ 32mH で一定値となる。



図8.角数と内径を変化させた場合のインダクタンスの変化

(7)式は、半径 0.5mの円形断面をもつ、透磁率 µの 無限長導体において、電流が断面を一様な密度で流れ ている場合の単位長さ当りの自己インダクタンスの 厳密解である[6]。

$$L = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\mu}{4} + \mu_0 \left( \log \frac{2l}{a} - 1 \right) \right\} = 39.8087 \,\mathrm{mH}$$
 (7)

この半径 0.5m の円形断面をもつ、単位長さ当りの 自己インダクタンスの厳密解 39.8087mH と、外径 0.5m,内径 0.01m,高さ 1m の 512 角柱に対する現代 磁気回路理論による磁気抵抗から求めたインダクタ ンス 32.2541mH を比較すると、頭一桁の数値は一致 する。

つぎに、導体の中心から離れるに従って変化する磁 束密度を勘案するために、外径 0.5m,内径 0.01m,高 さ1mの512角柱を多層の512角形へ分割し、合成磁 気抵抗を計算し、インダクタンスを計算する。図9は、 層数とインダクタンスの関係を示す。



図9.層数の増加に伴うインダクタンスの収束過程

図9より、層数の増加に伴い、インダクタンスの値 がより厳密解へ収束していることが確認できる。 すなわち、磁束の広がりが並列の準三次元磁気抵抗に よって勘案され、解析解へ収束したものと思われる。 よって、本論文で提案した準三次元磁気抵抗の妥当性 が検証された[7]。

#### 2.4.現代磁気回路理論による磁束分布

多層の512角形へ分割した各層の磁気抵抗に流れる 磁束を計算することにより、断面の磁束分布を求める ことができる。図 10 に層数を変化させたときの各磁 束分布を示す。図 10 より、層数が多いほど精度のよ い磁束分布が得られていることがわかる。



3. ウェーブレット変換の適用

本章では、ウェーブレット変換を用いて 64 層の磁 束分布を 4,8,16 層の磁束分布から再構成することを 考える。基本的な考え方は、以下に述べる通りである。 まず、4,8,16 層の磁束分布のウェーブレットスペクト ラムをそれぞれ計算する。次に、それらのウェーブレッ トスペクトラムが 64 次になるように 0 を追加する。最後 に、その 64 次にしたウェーブレットスペクトラムをウェ ーブレット逆変換することにより、4,8,16 層から 64 層の 磁束分布を再構成する。図 11-13 は再構成した磁束分布 を示したものである。





図 13.16 層から 64 層への再構成

ここで、図 11-13 に示す再構成された磁束分布の精度 を検証するために、それらと図 10(e)に示す厳密な 64 層 の磁束分布との相関係数を計算した結果を表1に示す。

衣工、相俟瓜叔			
Base Func.	$4 \rightarrow 64$	$8 \rightarrow 64$	$16 \rightarrow 64$
Daub2	0.844373	0.952552	0.986378
Daub4	0.918141	0.981794	0.993918
Daub6		0.974676	0.992275
Daub8		0.943508	0.98625
Daub10			0.976248
Daub12			0.962510
Daub14			0.945276
Daub16			0.924774

表1.相関係数

相関係数を示す表1から、少ない層数の磁束分布を ウェーブレット変換で再構成しているにもかかわら ず、比較的高精度に 64 層の磁束分布が再構成されて いることが確認できる。

4.まとめ

本論文では、有限要素法に基づく現代磁気回路理論 を提案した。

最初に、二次元の現代磁気回路理論を提案し、さら に、二次元の現代磁気回路理論を準三次元問題に拡張 した。その結果、現代磁気回路理論において、二次元 磁気抵抗から準三次元磁気抵抗への拡張は、リーマン 積分を解くことに帰することを示した。

次に、準三次元磁気抵抗の妥当性を吟味するため、 簡単な例題を通して、インダクタンスの計算を行った。 その結果、本論文で提案した準三次元磁気抵抗は、磁 束密度の変化を複数個の磁気回路で表現でき、厳密解 との比較により極めて良好な精度を有することを述 べた。

最後に、この準三次元的な現代磁気回路理論による 磁気抵抗から磁束分布を描き、その磁束分布をウェー ブレット変換により、多層の磁束分布に再構成するこ とを試みた結果、比較的高精度で再構成することが可 能であることが判明した。

#### 参考文献

- [1]P.P Silvester and Ferrari, "Finite elements for electrical engineers," Cambridge University Press (1990).
- [2]齋藤 兆古、"応用電磁気学入門、"法政大学大学 院講義資料.
- [3]Y.Saito, "Three dimensional analysis of nonlinear magnetostatic fields in a saturable reactor," Comp.Meths.Appl.Mech.Eng,Vol.13,No.1,Jan.,19 78,North-Holland.
- [4]Y.Saito, "Three dimensional analysis of nonlinear magnetodynamic fields in a saturable reactor,"Comp.Meths.Appl.Mech.Eng,Vol.22,No.3 ,June,1980,North-Holland.
- [5] 藪並 隼人、早野 誠治、斎藤 兆古、"有限要素 法に基づく磁気回路解析法"、電気学会マグネティ ックス研究会資料、MAG-00-118,(2000年6月).
- [6]山田 直平、"電気学会大学講座 電気磁気学(第 二改訂版)"、オーム社.
- [7] 藪並 隼人、早野 誠治、斎藤 兆古、"有限要素 法に基づく磁気回路解析法 準三次元問題への 拡張-"、電気学会マグネティックス研究会資料、 MAG-00-253,(2000年11月).

<u>キーワード.</u>

有限要素法、磁気回路法、リーマン積分、ウェーブレット変換

.....

#### Summary.

### Magnetic Field Computation with High Accuracy by Wavelets

Hayato Yabunami Seiji Hayano Yoshifuru Saito Department of Information, Electrical and Electronic Engineering, Hosei University

Previously, in order to carry out the three-dimensional magnetic field analysis in a most efficient manner, we proposed the theory of modern magnetic circuits based on finite elements discretization. This makes it possible to implement the three-dimensional magnetic field computation in a quite efficient manner similar to those of the conventional magnetic circuit theory. In the present paper, we try to apply the wavelet transform to a magnetic flux distribution in order to represent it by small computational effort. As a result, it is shown that the wavelet transform yields a fairly good distribution from small computation.

#### Keywords.

Finite Elements, Magnetic Circuit Theory, Riemann Integral, Wavelet Transform