

磁性材特性推定のシミュレーション

馬場 康典 堀田 裕弘 村井 忠邦

富山大学工学部

3C-2

1 はじめに

磁界の数値シミュレーションは、電気機器の開発や設計を行なう場合によく用いられる。その際、磁性材の形状や特性を与える必要があるが、実機器での磁性材形状は円柱状や棒状といった簡単な形状でないこともあって、加工されたあるいは複合磁性材の正確な特性を知ることが困難であることが多い。

本研究は、任意形状磁性材の特性を逆問題的に推定しようとするものであり、磁性材を囲む仮想境界上の磁束密度の観測値から磁性材特性を反復計算により推定するものである。この際、磁界計算が必要となるが、これに対してFEMを利用する。数値例として、軸対称3次元場のシミュレーション結果を示すと共に、観測値に含まれる測定誤差が推定精度に及ぼす影響などについて考察する。

2 推定法

磁気抵抗率の推定を行うに際しては、電流駆動により発生する磁界や磁束密度の分布を知ることが不可欠である。このため、

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \mathbf{J} = 0 \text{ (領域内で)} \quad (1)$$

$$\nu(\nabla \times \mathbf{A}) \times \mathbf{n} = \overline{\nu(\nabla \times \mathbf{A}) \times \mathbf{n}} \text{ (境界上で)} \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \overline{\mathbf{A}} \text{ (領域内のある点或は境界で)} \quad (3)$$

で表わされる磁界について解く必要がある。ここで ν は磁気抵抗率、 \mathbf{A} は磁気ベクトルポテンシャル、 \mathbf{J} は駆動電流密度、 \mathbf{n} は境界上の法線ベクトルであり、 $(\overline{\quad})$ は既定値を示す。

本報告では磁気抵抗率推定の原理として、重みつき残差法に基づいた次式を用いる。

$$\sum_{j=1}^N \int_{\Omega_j} (\nabla \times \mathbf{A})^2 d\Omega \Delta \nu_j = \int_{\Gamma} \nu_0 \{ (\nabla \times \mathbf{A}) - \overline{(\nabla \times \mathbf{A})} \} \times \mathbf{n} d\Gamma \quad (4)$$

ここで、 $\overline{(\nabla \times \mathbf{A})}$ は観測される磁束密度である。一方、 \mathbf{A} は磁気抵抗率分布を任意に仮定したときの

ベクトルポテンシャルで、有限要素法の使用により容易に求められる[1][2]。 ν_0 は空気の磁気抵抗率を示す。この式は、インピーダンスCTで用いられる基本式[3]と本質的に同じものであり、右辺は、磁性材微小領域（要素 Ω_j ）の磁気抵抗率が $\Delta \nu_j$ だけ変化したときの仮想的な境界 Γ での磁束密度の変化を示している。

図1の様に、観測データを得るための仮想境界を r 方向、あるいは z 方向に垂直にとり、有限要素法を用いれば(4)式は最終的に

$$\{a_{ij}\} \{\Delta \nu_j\} = \{b_i\} \quad (i = 1, 2, \dots, L) \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

の形の代数方程式となる。ここで L は駆動電流源の位置、 N は磁性材要素の数で、 $a_{11} \dots a_{LM}$ 、 $b_1 \dots b_L$ は係数、 $\Delta \nu_1 \dots \Delta \nu_L$ はそれぞれの磁性材要素の磁気抵抗率の増分である。

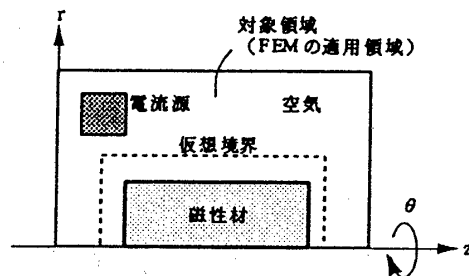


図1 対象磁性材と仮想境界

初期値として適当な磁気抵抗率から出発して(5)式で求められる $\Delta \nu_j$ により、それぞれの磁性材要素 ν_j の値は次のように修正する。

$$\nu_j(\text{new}) = \nu_j(\text{old}) + \alpha \Delta \nu_j \quad (6)$$

ここで α は収束の速さを調整するスケール因子であり、(6)式の収束条件は

$$\sum_{i=1}^L | \{b_i\} | < \epsilon \quad (7)$$

とする (ϵ は収束判定値で十分に小さい値)。この計算を繰り返し行い、磁気抵抗率の値を推定する。

Estimation of Magnetic reluctivity Based on a Finite Element Model

Noriyoshi Baba Yuukou Horita Tadakuni Murai Toyama University

3 数値例

図2の要素分割モデルでシミュレーションをおこなった。解析領域の周囲の境界にはハイブリッド型無限要素を付加した。従って、ベクトルポテンシャルの計算においては磁界が無限に及ぶことも考慮されている。磁性材は、飽和特性を考慮しない線形の等方性のものとした。磁性材は2種の磁気抵抗率のものが複合したものと想定し、磁性材(1)は $\nu=800[m/H]$ 、磁性材(2)は $\nu=80[m/H]$ とした。従って、この場合の未知数は2個であり、これに対応して電流源の位置をそれ以上の3個(電流源①,②,③)に選んである。反復計算の初期値は空気の磁気抵抗率に等しい $\nu_0=8 \times 10^5[m/H]$ を選んだ。

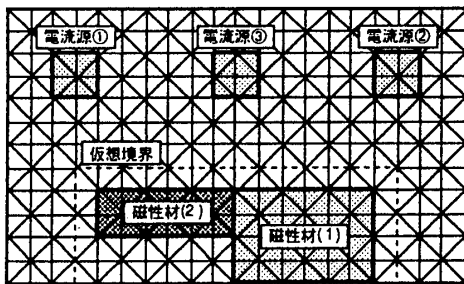


図2 要素分割の様子

図3、4に①②の2個の電流源を使用したときの解の収束の様子を示す。図3は(7)式の収束判定基準の変化である。反復回数15回程度でほぼ真の磁気抵抗率に推定されていることが分かる。

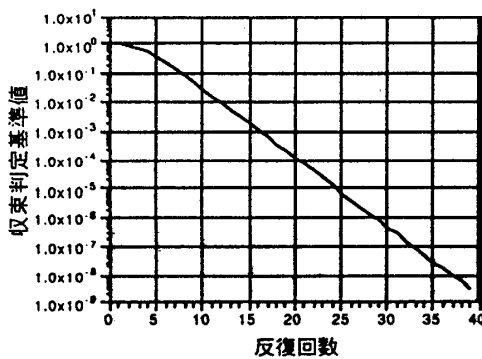


図3 解の収束の様子 ($\alpha=0.5$)

次に、観測値に測定誤差が加わったと想定し、その時の推定誤差(相対誤差)を、①②③と①②の電流源を使用した場合について示す。ただし、誤差を含んだ観測データとして、真の観測値に一定倍率かけたものを使用している。観測誤差と推定誤差が比例的になること、空気の磁性材との差の大きい磁性材(磁性材(2)が相当)ほど、推定が困難なことがわかる。

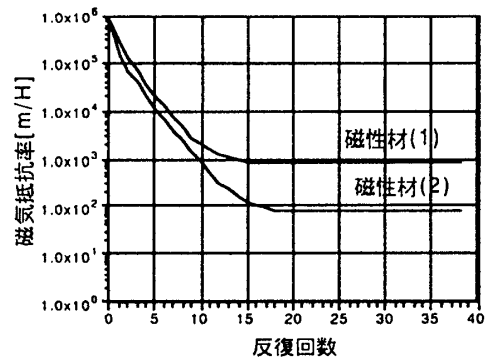


図4 磁気抵抗率の変化の様子

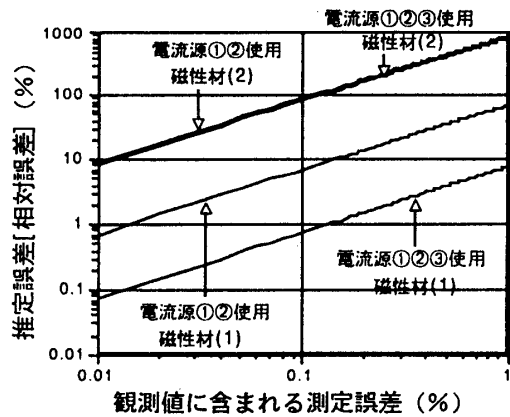


図5 測定誤差による推定誤差の変化

4 おわりに

今後は精度を向上させるような電流源の位置や大きさや数などについても考えていきたい。また、磁性材は本来飽和特性を有し、磁気抵抗率は非線形であるので非線形の特性的推定も行いたい。

文献

- [1] 加川著：“有限要素法の実際”、オーム社(1982)
- [2] 中田・高橋著：“電気工学の有限要素法”、森北出版(1982)
- [3] T. Murai and Y. Kagawa：“Electrical Impedance Computed Tomography Based on a Finite Element Model”、IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. BMG-32, NO. 3, Mar. 1985