

フィルム状導体の電流分布推定

○小川純一¹, 早野誠治², 斎藤兆古³
法政大学 工学部⁴

Estimation of the current distributions on a thin film conductor

J.Ogawa, S.Hayano, Y.Saito
College of Engineering, Hosei University

Abstract

In this paper, we propose a new method of solving for the inverse source problems. As an example, we applied our method to the current estimation problems on the film conductor. As a result, it is revealed that the current distribution on the thin film conductor can be estimated with fairly good accuracy.

1. まえがき

筆者等のグループでは表皮効果を利用した空心フィルム状変圧器の開発を行っている^[1]。この変圧器は小型軽量である。しかし、変圧器本来の電気的特性は周波数帯域が限定されている。変圧器として最適な設計を行うためには、フィルム形状対効率の周波数特性の関係がどのような電流分布に起因するかを把握する必要がある。

本稿はフィルム状導体における導体内の電流分布をフィルム状導体の周辺磁界分布の測

定によって推定し、その結果からフィルム変圧器の形状に関する最適設計を最終的目標とした研究の基礎に関するものである。

非接触に電流を測定する方法は導体周辺磁界から電流を求めることに帰するが、このような周辺磁界分布から導体中の電流分布を推定する問題はフィールド源推定に関する逆問題となり、一般に一意的な解は期待できない^[2-4]。

本稿では、このようなフィールド源推定に関する逆問題を解析する一方法として、離散値系 Wavelet 変換の性質を用いて近似逆行列を導出する方法を検討した。まず、

¹ 大学院修士課程 ² 電気電子工学科専任講師 ³ 電気電子工学科教授

⁴ 〒184 東京都小金井市梶野町3-7-2 Tel.(Fax) 0423-87-6200

解析解を用いて数値実験を行い、次に実験値について電流分布の推定を行った。更にその実験結果についての検証実験を行った。その結果、良好な結果が得られたのでここに報告する。

2. Wavelet変換を用いた電流分布推定

2. 1. 磁界系逆問題のシステム方程式

電流通電方向の長さは無限長、厚みを零とした理想的なフィルム導体に電流が流れている場合、通電方向に直交する導体面上で得られる磁界分布から導体内の電流分布を推定する問題を考える。

測定面で磁界分布が n 個測定され、フィルム状導体を通電方向に直角に m 個に分割した場合のシステム方程式は、アンペアの法則から次式で与えられる。

$$\mathbf{H} = \mathbf{C}\mathbf{I}$$

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_n \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{r_{11}} & \frac{1}{r_{12}} & \dots & \dots & \frac{1}{r_{1m}} \\ \frac{1}{r_{21}} & \frac{1}{r_{22}} & \dots & \dots & \frac{1}{r_{2m}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{r_{n1}} & \frac{1}{r_{n2}} & \dots & \dots & \frac{1}{r_{nm}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\mathbf{H}, \mathbf{I}, r_{ij}$ はそれぞれ測定された n 次の磁界分布ベクトルと求めるべき m 次の電流分布ベクトル、および分割した各電流と測定点間の距離である。一般に、周辺磁界の測定点数 n は導体の分割個数 m より圧倒的に少なく $m \gg n$ の条件が成り立つ。

2. 2. 離散値系 Wavelet 変換を用いた逆問題解析

本稿ではWavelet変換行列の基底関数として、Haar基底、Daubechiesの4次を用いた。



図1. 解析モデル

n 次、 m 次の Wavelet 変換行列をそれぞれ W_n, W_m とすれば、(1)式のシステム方程式の Wavelet 変換は次式で与えられる。

$$W_n \cdot \mathbf{H} = (W_n \cdot \mathbf{C} \cdot W_m^T) \cdot (W_m \cdot \mathbf{I}) \quad (2)$$

(2)式は次式のように書き直される。

$$\mathbf{H}' = \mathbf{C}' \cdot \mathbf{I}' \quad (3)$$

通常、Wavelet 変換された Spectrum は絶対値の大きな要素が Mother Wavelet の近傍に集まる性質を持っている。

システム行列 \mathbf{C} の Wavelet Spectrum 行列 \mathbf{C}' で、Mother Wavelet を含む $n \times n$ 次の正方行列を \mathbf{C}'_0 、全てを零要素とする $m \times n$ 次の行列を \mathbf{C}'_{zero} とすれば、Spectrum 行列 \mathbf{C}' の近似逆行列 \mathbf{C}'^{-1} は次式で与えられる。

$$\mathbf{C}'^{-1} = \mathbf{C}'_{zero} + \mathbf{C}'_0^{-1} \quad (4)$$

但し、 \mathbf{C}'_{zero} の1行1列から n 行 n 列の正方領域に \mathbf{C}'^{-1} が足し算されるものとする。よって、元のシステム行列 \mathbf{C} の近似逆行列 \mathbf{C}_{inv} は次式で表わされる。

$$\mathbf{C}_{inv} = W_m^T \cdot \mathbf{C}'^{-1} \cdot W_n \quad (5)$$

(5)式から(1)式の未知電流分布ベクトル \mathbf{I} は次式で求められる。

$$\mathbf{I} = \mathbf{C}_{inv} \cdot \mathbf{H} \quad (6)$$

3. フィルム導体の電流分布推定

3. 1. 数値実験

2. 1. で仮定した理想的なフィルム導体に対して、電流分布の解析解が存在する^[6]。Wavelet 変換を用いた逆問題解析法の妥当性を確かめるために、解析解の電流分布を与えた場合に測定面で得られる磁界分布から、元の電流分布を推定し、解析解と比較する。更にそれぞれの電流分布によって発生する磁界分布についても比較を行う。

図2に数値実験の結果を示した。図2(a)はフィルム導体に 20kHz の交流電流が流れる場合の電流分布の振幅を表わしている。横軸は導体の幅方向の位置である。図2(b)は図1に示した測定面で得られる磁界の接線方向成分を示している。図2(c)

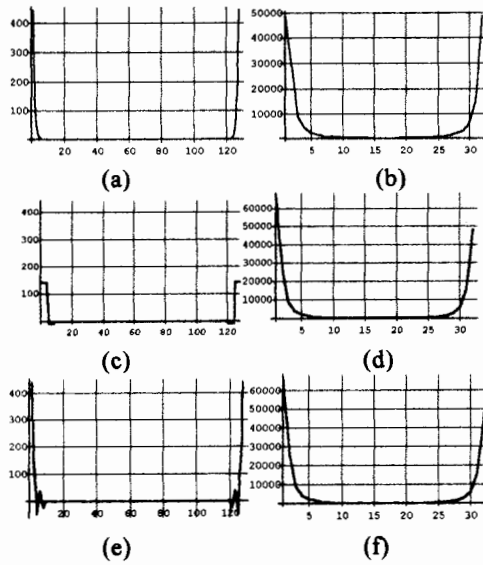


図2. 数値実験の結果 (a). 正解 (b). 正解の磁界分布 (c). 推定電流(Haar 基底) (d). (c)の電流による磁界分布 (e). 推定電流(Daubechies4 次) (f). (e)の電流による磁界分布

と(e)はそれぞれ Haar と Daubechies の4次を用いて推定された電流分布を示している。図2(d)と(f)はそれぞれ図2(c)と(e)の電流分布による磁界分布である。

これらの結果から、フィルム状導体の電流分布推定はある程度可能であることがわかる。

3. 2 フィルム状導体

図3に示す実験装置で、電流の通電方向に直交かつ導体に平行に位置する測定面上でフィルム導体上の磁界分布 $H_x(x)$ を測定した。測定されるフィルム導体の通電方向の長さ、幅、厚さはそれぞれ600mm, 64mm, 0.1mmである。磁界は等間隔に32点で測定した。実験で得られた磁界分布から推定した

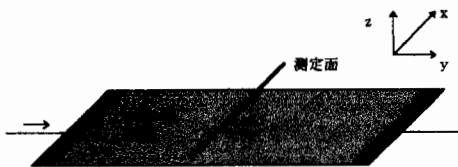
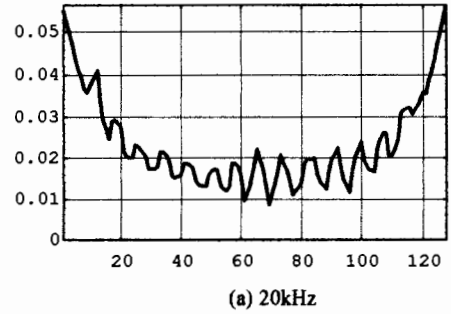
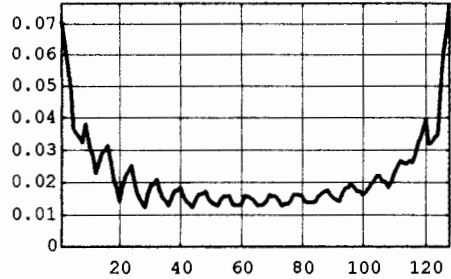


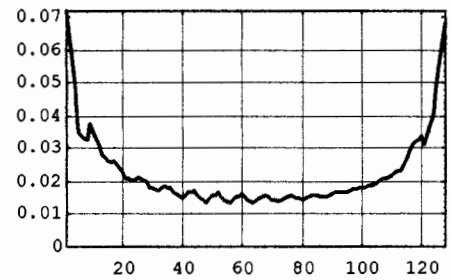
図3. 実験装置



(a) 20kHz



(b) 50kHz



(c) 100kHz

図4.. フィルム状導体の電流分布推定結果[A]

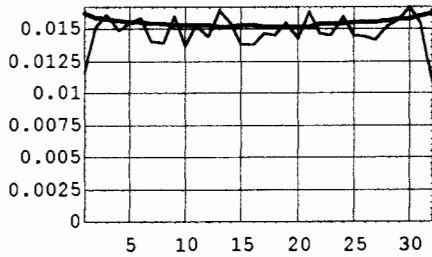
電流分布 $I_y(x)$ を図4に示す。尚、この計算にはDaubechiesの4次を用いた。

この結果から通電する電流の周波数が増大するにつれ、電流分布は導体端部に偏る傾向が見られる。また、3. 1. に示した解析解との比較を行うと、明らかに異なる電流分布パターンとなっていることがわかる。

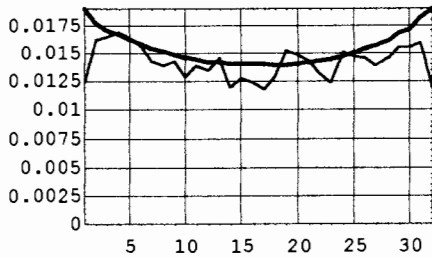
解析モデルは理想的なフィルム導体を前提としているが、図3の実験ではフィルム厚や長さが有限である。従って解析解とは一致しない。

3. 2. 並列導線の電流分布推定

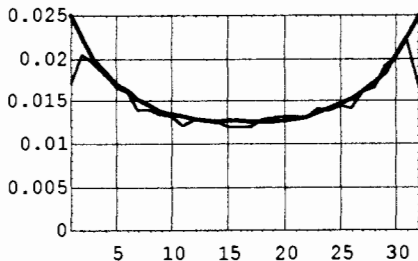
図3の実験装置でフィルム導体の代わりに直線状の導線を平行に32本配置し、3.1と同様な電流分布の推定を行い、実測した電流分布との比較を行った。図5に結果が示してある。この結果から、電流分布の実測値と推定値は良好な精度で一致している事が判明した。



(a) 20kHz



(b) 50kHz



(c) 100kHz

図5. 並列導線の電流分布[A]
太線...実測値 細線...推定値

4. まとめ

本稿では、離散値系Wavelet変換を用いた逆問題解析法をフィルム状導体の電流分布

推定問題に適用し、その検証実験を行った。その結果、Wavelet変換を用いて、フィルム状導体の電流分布の推定がある可能であることが判明した。

謝辞

最後に、本論文の理論について有益な議論と助言をいただいた三菱電機先端技術総合研究所の依田潔博士に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Y.Midorikawa, et al., "Electromagnetic field analysis of film transformer" IEEE Trans. Magn. Vol. 31, No.3, May 1995, pp. 1456-1459.
- [2] Y. Saito, et al., "A formation of the inverse problems in magnetostatic fields and its application to a source position searching of the human eye fields" J.Appl. Phys., Vol. 67, No.9, May 1990, pp.5830-5832.
- [3] H.Saotome, et al., "Electromagnetic field source searching from the local field measurement." Int. J. Appl. Electromagn. Mater., Vol. 3, 1993, pp. 297-306.
- [4] 土井 他, 「試行パターン一致法による導体内の欠損推定」, 電学論A, 114巻4号, 1994年, pp. 290-295.
- [5] 小川 他, 「フィルム状導体における表皮効果と近接効果の測定」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-95-116.
- [6] M.Yamaguchi, et al. "A new planar-type current detector utilizing the skin effect in soft-magnetic materials", IEEE Trans. Magn. Vol. MAG-25, No.2, 1989, pp.3824-3826.