

ウェーブレット変換による最適化問題解析 -平面型磁気センサの設計-

鳴田知和[○], 早野誠治, 斎藤兆古 (法政大学工学部)

Wavelet Analysis of Optimization Problems -Designing of a flat shape magnetic sensor-

T.Naruta[○], S.Hayano, and Y.Saito

ABSTRACT

Modern magnetic sensors such as eddy current sensor are widely used for the non-destructive testing to search for the defect and crack in the metallic materials constructing the aircraft, ship, bridge and so on. Recently, flat shape magnetic sensors having high sensibility are required to check up the quality of iron sheets, because only small defect or crack invokes a deterministic fault cans used for the drinks, e.g. beer, cokes and fruit juice. We are now developing a flat shape magnetic sensor to respond such a requirement. Sensibility of our magnetic sensor mainly depends on the rate of inductances between the off and on target magnetic material. This means that we have to carry out the inefficient inductance computations changing various design parameters. Since the value of inductance change greatly depends on the magnetic flux distribution at the vicinity of target magnetic material, then it is possible to design the magnetic sensor in a quite efficient manner when evaluating the feature of magnetic field distribution. In the present paper, we apply a multi-resolution analysis to the change of magnetic fields at the vicinity of target magnetic material. As a result, a homogeneous magnetic field change between off and on target dominates the change of inductance value.

Key words: magnetic sensor, magnetic fields, multi-resolution analysis

1. まえがき

エレベータやエスカレータさらに航空機などにおける金属疲労による欠陥は、事故につながる恐れがあり、これを未然に防ぐため、金属材料の非破壊検査は必要不可欠なものとなっている。金属の非破壊検査法として、超音波、放射線、電気抵抗、渦電流などが用いられている。いずれのセンサもシステムを構成する素子の中で最も重要なのはセンシング部分であり、本論文では平面型磁気センサにおけるセンシングコイルの最適化設計問題を扱う。

最適化問題は、複数個、例えば n 個のパラメータを変化させて特定の目的関数 f を満足させるパラメータ決定問題を解くことに帰する。多くの場合、 n 個のパラメータと目的関数 f 間の関係は単純ではない。このため、何らかの試行錯誤的反复を必要とする。本論文では、目的関数 f をターゲットの有無によるインダクタンスの変化、パラメータをコイル巻き数・外鉄の厚さ・内鉄の半径とする。

磁気センサの磁界分布を計算するために、本論文では

有限要素法を採用するが、有限要素法では境界条件を明確に規定された閉領域中の計算を前提としている。ここで開領域問題に取り組むために開境界の解を対象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) ^{1) 2)} を有限要素法に適用する。

センサの設計パラメータを変更し磁界分布計算する。さらに、磁界分布からインダクタンスを計算する。この過程を反復して、ターゲットの有無によるインダクタンスの最大変化が得られる条件を求める。センサ感度が最大、すなわち、インダクタンスの変化が最大となる場合のベクトルポテンシャル変化分についてウェーブレット変換の多重解像度解析を適用して、ターゲットの有無による磁界分布の特徴を抽出する。

2. 平面型磁気センサの最適設計

2.1. 磁気センサの形状

本論文では、薄い金属板中のクラックや欠損などを探査用の磁気センサとして、Fig. 1に示す外鉄と内鉄からなる同軸円筒状のモデルを考える。

Fig. 1で、センサは中心部に内鉄と上面を削り抜いた円盤状の外鉄からなり、内鉄と外鉄間に励磁コイルを巻く構造である。上方の円盤はターゲットの磁性体である。

2.2. 磁界分布解析

2.2.1. 双対映像法

Fig. 1に示すように多くの磁気センサ解析は、本来タ

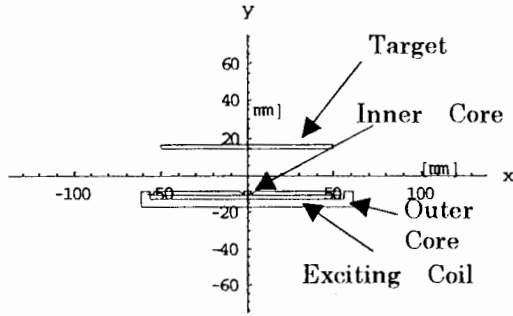


Fig. 1 Schematic diagram of a flat

ーゲットの磁性体を探査する目的であるため、必然的に磁界が無限遠点まで広がる開領域問題を解くことに帰する。

Fig. 2(a)に示すように、有限要素法で離散化して得られた任意の電流 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Fig. 2. (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 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 $\partial A / \partial t = 0$ 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を設定することで、開領域フィールドの開領域フィールドの回転方向成分を求める。問題空間中のほかの電流に対しても、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、理学で現れる問題は、大部分の場合系全体としての電流はゼロとなるから、仮想境界の外側にあるイメージ電流の総和もゼロにならなければならない。よって、

$$\sum_{p=1}^q (d_p / a) i_p = \sum_{p=1}^q (d_p / a^2) i \quad (1)$$

$$= a \sum (1/r_p) i_p = 0 \quad (2)$$

が成り立たなければならない。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 までの距離を表す。(2)式の条件は、原点 o でベクトルポテンシャル A がゼロとなることを示す。次に磁界源として、電流 i の代わりに電荷 m をFig. 2(a)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 $-(d/a)m$ のイメージ磁化を想定すると、Fig. 2. (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、 $\partial A / \partial t = 0$ の対象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/球上において対象境界条件を設定することで、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。^{1) 2)} 双対映像法を用いれば、グリーン関数を仮定する必要の無い、有限要素法や差分法が適用できるためである。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発展性が期待できる。

Fig. 1の磁気センサ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Fig. 3に示す軸比 (長軸/短軸) = 1.815の値を持つ楕円形となる。対称境界条件問題とゼロ境界条件問題を連立して解くことで開境界条件問題を有限要素法で解くことができる。

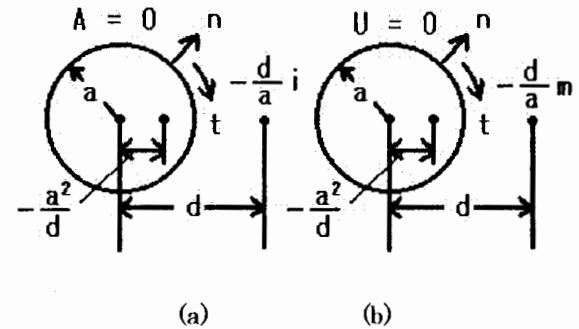


Fig. 2 Image of 2D/3D problem (a) The image to find a rotation direction element. (b) The image to find a emission direction element.

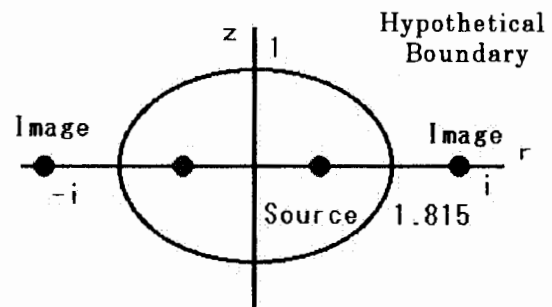


Fig. 3 Principle of the strategic dual image method for obtaining the open boundary finite elements solution

2.2.2. 有限要素解

Fig. 1の磁気センサが生成する磁界分布をFig. 4とFig. 5に示す。Fig. 4はターゲットの磁性体が存在しない場合の磁界分布であり、Fig. 5はターゲットの磁性体が存在する場合の磁界分布である。

2.2.3. インダクタンスの変化

Figs. 4, 5から明らかに磁界分布がターゲット磁性体の存在によって異なる事がわかる。これが、磁気センサのインダクタンスの変化を喚起する。すなわち、磁性体の有無がインダクタンスの変化として探査される。これが本磁気センサの動作原理である。

Figs. 6, 7にコイルの巻き数を変更した場合で、ターゲット磁性体がある場合と無い場合のインダクタンスの変化率を示す。Fig. 6は中心軸の内鉄の半径を2mm、外鉄の幅を2mmとした場合である。Fig. 7は内鉄の半径を4mm、外鉄の幅を2mmとした場合である。いずれの場合も鉄心の寸法に対する依存性は少なく、コイル巻数がインダクタンスの変化率を支配することがわかる。この例では25回巻のコイルが最適である。

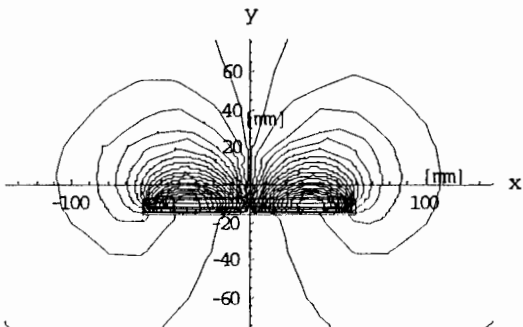


Fig. 4 Example of magnetic flux distribution under off target condition

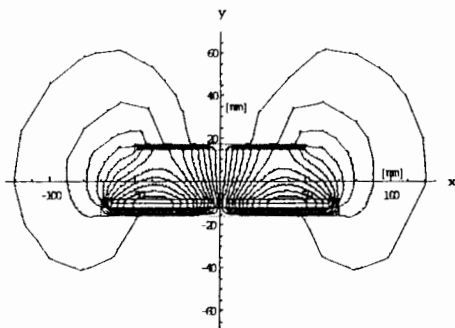


Fig. 5 Example of magnetic flux distribution under on target condition

2.3. ウェーブレット多重解像度解析

磁気センサコイルへ流す励磁電流を一定値とし、最適な25回巻励磁コイルが生成する磁界を、ターゲットがある場合と無い場合について計算し、ターゲット直下に沿った位置におけるベクトルポテンシャルの変化分を取り出す。すなわち、ターゲット磁性体の存在の有無で変化する磁束密度の主成分を取り出し、これにウェーブレット変換の多重解像度解析を適用し、ターゲット磁性体の有無によるインダクタンス変化率へ最も大きく寄与する磁界の空間分布特性を吟味する。本センサは軸対称であるため、ベクトルポテンシャルの評価はFig. 1の右側半分で行うことができる。

Fig. 8は、それぞれドビッシーの2, 4次基底関数を用いた場合の多重解像度解析結果である。いずれの場合も、

最も低次レベルの磁界分布が支配的であることがわかる。すなわち、ターゲット直下若しくは励磁コイル直上の並行面で磁界の垂直成分が一樣である場合、最適な磁気センサが設計されることを意味する。

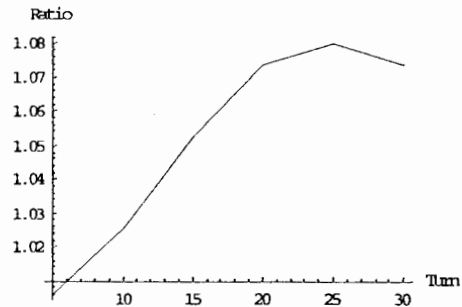


Fig. 6 Inductance variation rate between the on and off targets when changing the number of turns of an exciting coil. Radius of inner core: 2mm, Thickness of outer core: 2mm

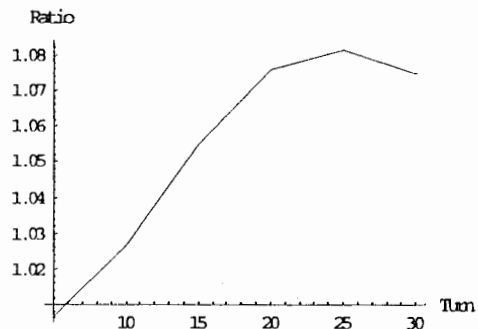


Fig. 7 Inductance variation rate between the on and off targets when changing the number of turns of an exciting coil. Radius of inner core: 4mm, Thickness of outer core: 2mm

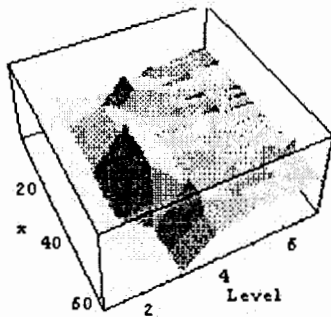
3. まとめ

本論文では、薄板状鋼板の欠損探査を目的とした平面型磁気センサの最適設計を行う問題を検討した。磁気センサは探査対象の存在を探索する機能を持つ、このため、磁気センサの解析は必然的に閉領域問題を解くことに帰する。本論文では、将来の磁気非線形性を勘案すべく、双対映像法を用いて閉領域問題を閉領域問題へ置き換え、閉領域問題を有限要素法で解く手法を採用した。磁気センサの感度は、ターゲットの存在の有無によるセンサのインダクタンス変化率に比例する。インダクタンスの変化率はターゲットの存在の有無による磁界分布の変化率で決まる。数値シミュレーションの結果は、平面型磁気センサの感度は励磁コイルの巻数で決まることが判明した。

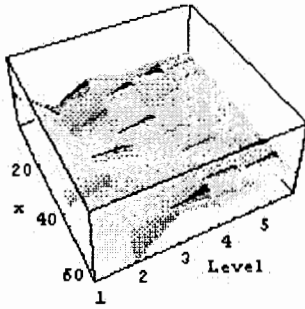
最適な励磁コイルの巻数で作成されたセンサで、ターゲットの有無による磁束分布の変化量へウェーブレット変換の多重解像度解析法を適用して、センサ感度が最大となる磁束分布の特徴抽出を試みた。その結果、センサ直上、若しくはターゲット直下の磁束密度が一様に分布することがセンサコイル設計のキーポイントであることが判明した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.



(a) Daub 2



(b) Daub 4

Fig. 8 Results of the wavelets multi-resolution analysis using the Daubechie' s 2nd (a) and 4th (b) order base function, while the magnetic vector potential difference between off and on target conditions.