

# 有限要素法による差動磁気センサーの解析

河内 裕記\*、遠藤 久、早野 誠治、斎藤 兆古  
(法政大学)

## Magnetic Sensor Analysis by Finite Elements

Hironori Kochi, Hisashi Endo, Seiji Hayano and Yoshifuru Saito ( Hosei University )

### Abstract

Time domain electrical signal represents various physical signals, for example, sound, pressure and so on. In any signals, it is classified into two major signal components. One is a meaningful signal reflecting on a physical cause. The other is the noise caused by various physical and artificial conditions, e.g., electromagnetic inductions when converting the physical signals into electrical quantities. Thereby, extraction of a meaningful time domain signal is one of the most important processes in the sensor signal processing.

In the present paper, at first, we evaluate the finite elements solution of a magnetic sensor in order to obtain the noise free sensor signal components. Second, we carry out the practical sensor signal measurements. Third, we compare them to estimate the noise signal components. Thus, it is possible to exact only the meaningful sensor signals theoretically. To search for the noise cause, we visualize the magnetic fields of the sensor and check up the electromagnetic disturbances caused by the sensor target. As a result, it is found that the major electromagnetic noise components are caused by the mechanical accuracy of the sensor structure not by the environmental electromagnetic inductions.

キーワード：有限要素法、磁気センサー、磁界分布  
(finite element method, magnetic sensor, magnetic field)

### 1. はじめに

磁気センサーには、大きく分けて材料の特性を利用した、いわゆる、ホールセンサーのような物性応用に基づく形式とセンサーコイルを巻いて作成するセンシングコイル形式へ分類される。ホールセンサーは、AV機器のみならず、コンピュータで代表される映像情報処理機器へ広範に使われている。他方、コイル形式は、ECT (Eddy Current Testing) 応用などで使用される代表的磁気センサーであり、原子炉の熱交換器を始め多くの金属構造物に対する非破壊検査に使われている。コイル型磁気センサーの中で、差動コイル型磁気センサーは、出力信号が直接差動コイルで微分演算されるため、信号処理用電子回路への依存性が低く、且つ、高感度である。しかしながら、得られる信号が微分演算処理を受けているため、信号波形の解析に一定の習熟度を必要とする。また、外部の磁界やセンサーの機械的工作精度によるセンサー信号への影響などを考慮に入れた解析を必要とする。

本論文では、差動コイル型磁気センサーのセンサー出力信号を有限要素法を用いて解析する。実際のセンサー信号にはセンシングターゲットによる信号と多くの誤差信

号を含んでいる。このセンサー信号と有限要素法により求めた解析値とを比較する。これにより、差動コイル型磁気センサーの出力信号からノイズと信号の分離が可能となる。結果として、差動コイル型磁気センサーの感度は、機械的工作精度に大きく依存することが判明した。

### 2. 差動コイル型磁気センサー

#### 2.1. 差動コイル型磁気センサーの動作原理

差動コイル型磁気センサーの構成図を図1に示す。図1で、中央のコイルに励磁電流を通電することでコイル軸方向へ流れる磁束を形成する。他方、励磁コイルを中心として上下に位置するサーチコイルは差動接続され、両者を共通に同一の磁束が貫いた場合、出力電圧は生じない。しかし、サーチコイル間の中心からずれた位置にアルミなどの導体が存在すると、導体に流れる渦電流の磁界が上下の差動コイルに平等に鎖交せず、差動接続されたサーチコイルに電圧が誘起する。従って、差動コイルに誘起する電圧を測定すれば、軸上の導体の位置が検出できる。これが差動コイル型磁気センサーの原理である。(1, 2, 3)

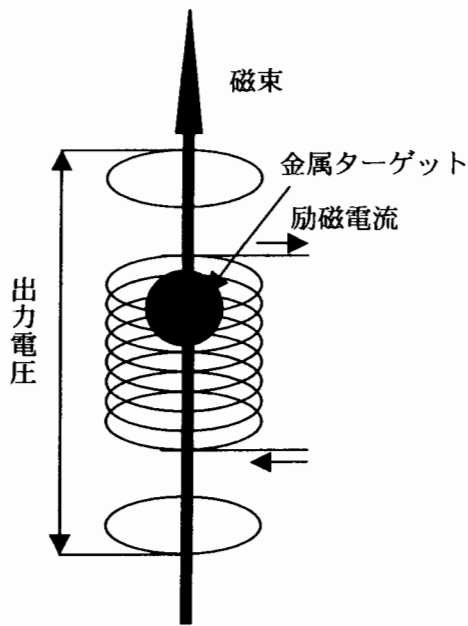


図1 差動コイル磁気センサー

## 2.2. センサーの出力信号

図2にターゲット金属が中心と中心から1cm, 2cm, 3cm, 4cm離れたところにある場合の出力信号をそれぞれ示す。励磁電流は周波数100kHz, 4Aの正弦波である。ターゲット金属が中心にある場合の出力信号は零である。ターゲット金属が中心からずれていくに従い出力信号の最大振幅は大きくなり、ピークをむかえ、徐々に小さくなっていくことがわかる。

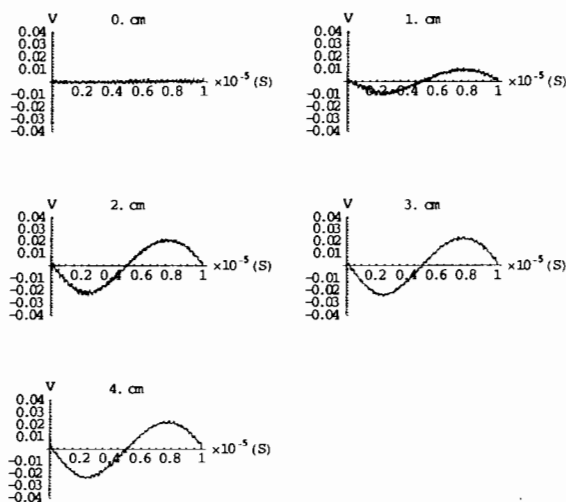


図2 センサー出力信号

## 3. 有限要素解析

有限要素法は、その本質的な性質として、境界条件が明確に規定された、閉領域問題を前提としている。このためフィールドが無窮遠点までつながる開領域問題には直接適用できない。そこで、電気映像法を拡張した双対映像法によって開領域を閉領域に置き換え、この閉領域問題に有限要素法を適用する。(4, 5)

### 3.1. 双対映像法

図3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3(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  $\partial \mathbf{A} / \partial n = 0$  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、系全体としての電流の総和はゼロ。すなわち、 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$  を満足する。これは、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  $i$  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 [H/m] 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3(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  $d$  に位置に  $-(d/a)m$  のイメージ磁荷を想定すると、図3(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。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が、開領域問題へ適用できる。

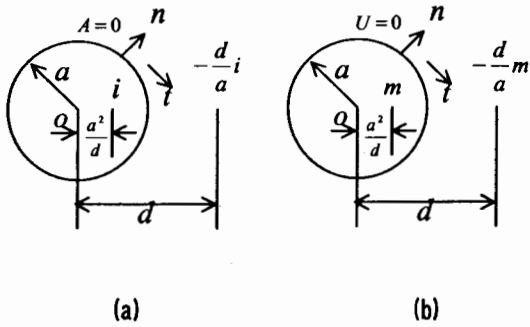


図 3

- (a) 回転方向成分を求めるイメージ
- (b) 発散方向成分を求めるイメージ

### 3.2. 磁気センサーの有限要素モデル

問題領域のメッシュを図 4 に示す。磁界系の軸対称三次元問題は、 $r-\theta-z$  円筒座標系において、電流密度  $J$  は  $\theta$  方向成分のみであり、 $z$  軸において零境界条件が成立する。従って、ベクトルポテンシャル  $A$  も  $\theta$  方向成分のみであるから、ここでは軸対称三次元開領域問題として、磁気センサーの有限要素解析を行う。

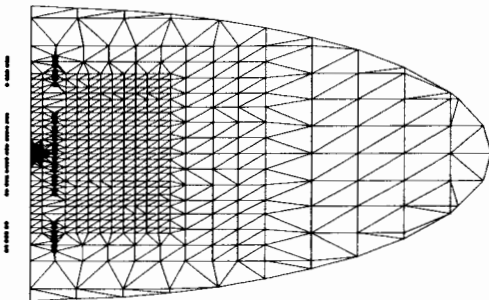


図 4 問題領域のメッシュ

### 3.3. 磁界分布

図 5 は有限要素法によって求めた磁界分布で、ターゲット金属が中心、中心から 2cm、4cm の位置にある場合の磁界分布を示す。ターゲット金属に流れる渦電流は入力磁界を打ち消す方向に磁界を発生させるため、図 5 に示すようにターゲットが存在しないサーチコイルに多くの磁界が貫いていることがわかる。

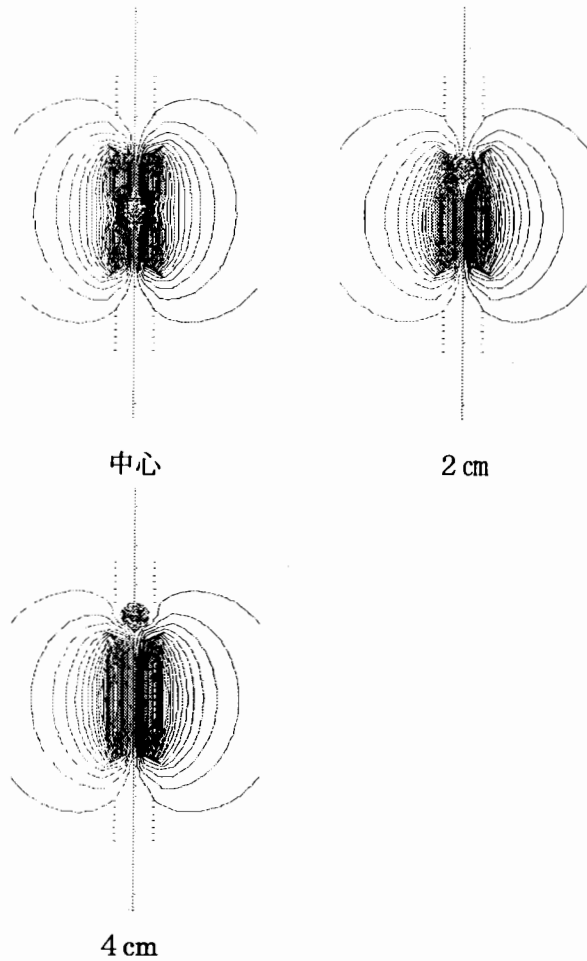


図 5 磁界分布

### 3.4. センサー出力信号

磁界分布の解析結果から、センサーの出力信号を求める。センサー出力信号は、上下のサーチコイルの出力電圧が互いにキャンセルリングする形で出力される。図 6 は、有限要素法によるセンサー出力電圧波形を示す。(a) が解析値であり、(b) が実験値である。信号波形の上の数字はターゲット金属の中心からの距離を示す。図 6 から、測定値にくらべ解析値は、ターゲットのリアクション信号をノイズ無く与える。他方、実験値は高周波ノイズを含有しているが、両者は比較的良好に一致することが分かる。

また、図 7 に解析値、実験値それぞれの実効値を示す。解析値ではターゲット金属が中心から 3cm の位置でピークを持つが、実験値では、ピークが存在せず飽和的である。これは、センサー出力信号のピーク値近傍で、コイルの機械的工作精度、すなわち、スパイラル上に巻かれたサーチコイルの影響が拡大され、理想的な、軸対称モデルと異なる結果を与えていると考えられる。

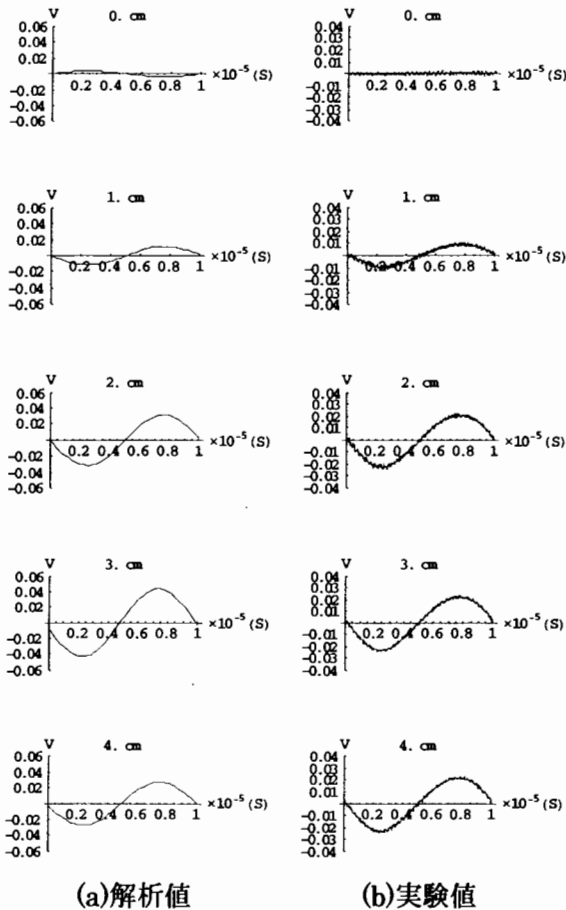


図6 センサー出力信号

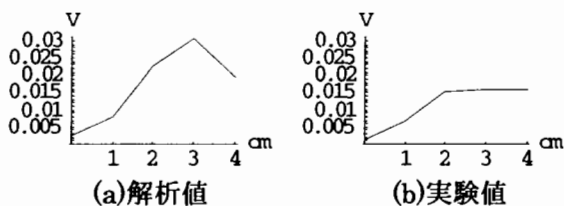


図7 出力信号の実効値

#### 4. まとめ

本論文では、差動コイル型磁気センサーを有限要素法を用いて数值的に解析し、実験値と比較、検討した。その結果、出力信号のピーク値近傍で誤差が大きくなることを示した。これは、本論文で試作した差動コイル型磁気センサーの最大感度は、ターゲット金属が一方のセンサーコイル中に存在する場合が最大となる。しかし、実際のセンサーコイルはスパイラル状に巻かれているため、結果として、完全な軸対称モデルとの差異、すなわち、セン

サーコイルのピッチの影響が拡大されることが判明した。

#### 参考文献

- (1) 河内裕記、“差動コイル型磁気位置センサーの開発”1998年度法政大学卒業論文。
- (2) 河内裕記“ウェーブレット変換を用いた差動磁気センサーの可視化信号処理”第27回可視化情報学会論文,1999。
- (3) 松山賢治、“磁性体・金属三次元位置センサーの開発-基礎理論と実験”電気学会マグネティックス研究会資料, MAG98-111, 1998。
- (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) 高橋和彦、“双対映像法による開領域電磁界解析”1988年度法政大学修士論文。