法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-06

有限要素法による差動磁気センサーの解析

SAITO, Yoshifuru / 遠藤, 久 / 河内, 裕記 / HAYANO, Seiji / 早野, 誠治 / ENDO, Hisashi / KOUCH, Hironori / 斎藤, 兆古

(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) 14 (開始ページ / Start Page) 75 (終了ページ / End Page) 78 (発行年 / Year) 2001-03-31 (URL)

https://doi.org/10.15002/00024919

河内 裕記 遠藤 久 早野 誠治 斎藤 兆古 法政大学工学部電気電子工学科

本論分では、試作した差動コイル型磁気センサーの磁界分布を有限要素法を用いて解析する。。そして、 実際に測定した磁界分布と比較し、磁界分布の特徴を考察する。また、有限要素法により求めた磁界分 布に時間方向へのウェーブレット変換の多重解像度解析を行い、励磁コイルによる磁界とターゲット金 属の渦電流による磁界に分離する。

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 リ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、閉領域問題を前提にしている。この ためフィールドが無限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、電気影像法を拡張した双対 影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]



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

3.1. 双対影像法

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、 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。

$$a\sum_{p=1}^{q} (i_p / r_p) = 0.$$
 (1)

ここで、qは電流の総数を表し、dpはipの電流に対 するイメージ電流の位置、さらにrp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、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影像法 (Strategic Dual Image Method)を適用する。以上の双対 影像法を用いれば、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。

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--z円筒座標系において、電流密度 J は 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 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。

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。



2cm

中心

4 cm



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 用いて数値的に解析し、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、"双対影像法による開領域電磁界解析"1988 年度















(b)実験値

図6 センサー出力信号

キーワード.

有限要素法、磁気センサー、磁界分布

Summary.

Magnetic Sensor Analysis by Finite Elements

Hironori Kouch Hisashi Endo Seiji Hayano Yoshifuru Saito Department of Electrical and Electronic Engineering, Hosei University

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.

Keywords.

finite element method, magnetic sensor, magnetic field