

# 磁性体・金属の3次元位置センサーの開発

—基礎理論と実験—

松山賢司\*、早野誠治、斎藤兆古  
法政大学工学部

Three dimensional position searching of the magnetic and metallic materials  
-Part 1 Principle and Initial Experiment-

K.Matsuyama,S.Hayano,and,Y.Saito  
College of Engineering,Hosei University

## Abstract

This paper concerns with the three dimensional position and shape identification problems of magnetic and metallic materials. Basic theoretical background as well as experiments are outlined.

According to the several experimental results, it is revealed that an alternating magnetic field excitation method promises highly reliable information.

キーワード：磁界、センサー、交流励磁  
(Magnetic field, Sensor, Ac exciting)

## 1. まえがき

磁性体や金属の3次元的位置探査は、橋梁やビルの建設物中の構造材である鉄筋の非破壊検査や地中に埋設された鉄パイプの位置探査だけでなく、空間中に存在する金属材料の位置制御を行う場合の基幹技術である。

磁性体や金属の特徴は磁界分布に影響を及ぼすことである。例えば、地球自身が微弱であるが磁界に覆われているから、地中や海中に磁性体が存在すれば地球磁界が乱され、結果として乱された磁界分布から磁性体の存在を知ることができる。また、磁界が交流であれば、金属中に渦電流が流れるために磁界が乱され、金属の存在が探知される。磁気測定による磁性体や金属の位置探査は、空間の媒質が磁性体や導体で無い限り原理的に可能である。これは埃や汚れに強く非接触で磁性体や金属のセンシングが磁界を利用すれば可能であることを意味する。

Maxwell の方程式によれば、磁束密度の発散は常にゼロである。換言すれば、磁界は回転的な性質のベクトルであるから必ず閉じた形に分布する。磁性体の自発磁化ベクトルや金属中の渦電流が生ずる磁界も、磁性体や金属の形状や外部磁界が加わる方向に依存するが、それぞれを覆う形で閉じた磁界分布を形成する。これは、磁性体や金属の存在を示す磁界分布の乱れが磁性体や金属の近傍で大きく、距離が離れるに従って急激に減衰することを意味する。このため、磁界を利用した磁性体や金属のセンシングには高感度な磁気センサーが必要とされる。

本稿は、磁性体や金属の3次元的位置を探査する磁気センサー開発に関するものであり、基本的な原理と初期実験を行った結果をここに報告する。

## 2. 磁性体・金属の磁気センシング

### 2.1 原理

磁性体や導体を除く任意媒質中にある磁束密度  $B_s$  が分布しているとする。この空間中に磁性体や金属が存在する場合、磁束密度が  $B_s$  から  $B_x$  へ変化したとする。

但し、 $B_s=0$  の場合、ターゲットは磁化された永久磁石であり、 $B_s$  が直流の場合、ターゲットは磁性体、さらに  $B_s$  が交流の場合、ターゲットは非磁性金属とする。簡単のため、図1に示す例を考えよう。

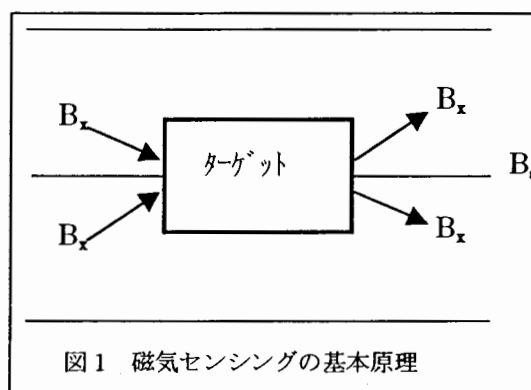


図1は外部磁束密度  $B_s$  が直流でターゲットを磁性体とした場合である。ターゲットが永久磁石である場合、外部磁束密度  $B_s$  は存在しなくてもよい。ターゲットが金属である場合、外部磁束密度  $B_s$  は交流であり、ターゲットが生ずる磁束密度  $B_x$  の方向はLenzの法則により図1と逆方向になる。さらに、外部磁束密度  $B_s$  が交流で、且つ、ターゲットが磁性体である場合、ターゲットである磁性体の透磁率が大きく渦電流が無視できるとすれば、図1と同一条件が成り立つ。しかし、タ

ターゲットの導電率が大きく渦電流が支配的磁束密度を形成する場合は、通常の金属と同様にターゲットが生ずる磁束密度  $B_x$  の方向は図 1 と逆方向となる。この条件は、外部磁束密度  $B_s$  が磁性体に完全に磁気飽和する程度の大きな直流磁界と小振幅の交流磁界である場合にも成り立つ。いずれの場合も磁束密度分布の変化  $B_s - B_x$  を測定することで磁性体や金属の有無が分かる。

## 2.2 磁性体・金属の位置探査

磁性体や金属の有無を知るには特定の位置における磁束密度の変化を知ればよい。問題は何れの位置の磁束密度を測定すれば、最も大きな磁束密度の変化が得られるかにある。この問題に対する解答は簡単で、ターゲットとなる磁性体や金属に近いほど良い。これは、ターゲットの発生する磁界が最も大きいためである。しかし、現実にはターゲットが存在する位置情報が与えられない限り最も感度の高い測定が不可能である。また、実用上の観点から、磁束密度の測定はセンサー位置を固定して行うことが望ましい。

ここでは磁束密度の変化から、1) 磁性体や金属の位置制御を行う場合に磁性体や金属の最適形状を求める問題、2) 予め既知形状の磁性体や金属の位置を求める問題、3) 磁性体や金属の形状と位置の両方を求める問題を考える。

### 2.2.1 位置制御のために磁性体や金属の最適形状を求める問題

この問題を解く手段は単一センサーを前提とするか複数センサーを前提とするかで異なる方法が考えられる。単一センサーを前提とする場合、3 次元的磁束密度分布の空間変化情報を単一センサーで得ようとする考え方である。このため、センサーから得られる情報は 3 次元的磁束密度分布の空間的変化の平均値となり、ソフト的な情報処理よりもハードウェアの構成に依存性が高い。他方、複数個のセンサーを前提とする場合、3 次元的磁束密度分布の空間的変化情報が活用できるため、ソフト的な情報処理が適用できる。本稿では、単一差動コイルをセンサーとした場合について吟味する。

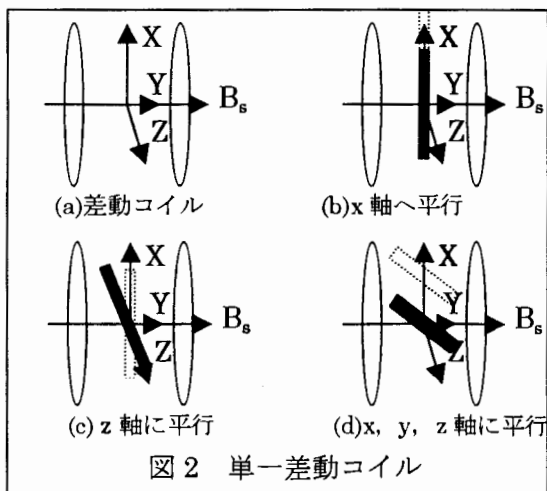


図 2 単一差動コイル

図 2(a)に示す差動コイルを考えよう。外部の磁束密度  $B_s$  は  $y$  軸方向へ平行に左右の円形サーチコイルを通過する。このため、左右のサーチコイルは同一磁束と鎖交するが差動接続であるから、その出力はゼロである。図 2(b)に示すように直線状ターゲットが  $x$  軸へ平行に点線位置から原点位置へ動いた状態を考える。図 2(b)で、ターゲットが点線もしくは原点位置であろうと左右に位置するサーチコイルから等距離である  $x$  軸上に存在する限り、左右のサーチコイルは同一磁束と鎖交するから差動コイルの出力はゼロである。同様に、図 2(c)に示すように  $z$  軸へ平行にターゲットが位置する場合も差動コイルの出力はゼロである。すなわち、図 2(d)に示すように、実線で示す直線状ターゲットの中心が  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸の原点に位置する限り、 $y$  軸上に位置する差動コイルは  $y$  軸方向の位置変化のみを検出する。

図 2(d)で、ターゲットが点線で示す位置に存在する場合を考える。この場合、左右のサーチコイルに鎖交する磁束数が異なるため、差動コイルから出力が得られる。ターゲットの両端の断面がサーチコイルの断面積に近いほど左右のサーチコイルに鎖交する磁束数の差が大きくなるため、差動コイルの出力は大きい。従って、ターゲットは両端がサーチコイルの断面形状と同一断面積となる球状とした図 3 に示す形状が最適となる。ターゲットの両端を球状とする理由は、1) 反磁界係数が何れかの方向からも同一値  $1/3$  であり、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸へターゲットの存在が均等に反映するため、および 2) 外部磁束密度  $B_s$  が交流である場合、外部磁束密度  $B_s$  の方向に依存せず相似な渦電流となり、ターゲットの中心が  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸の原点と一致したとき左右同一の渦電流分布となるためである。また、ターゲットの両端を結ぶ線分は  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸の何れに対して等角度  $45$  度で最大感度となるであろう。1 軸でも平行となると平行な軸方向の位置感度はゼロとなる。

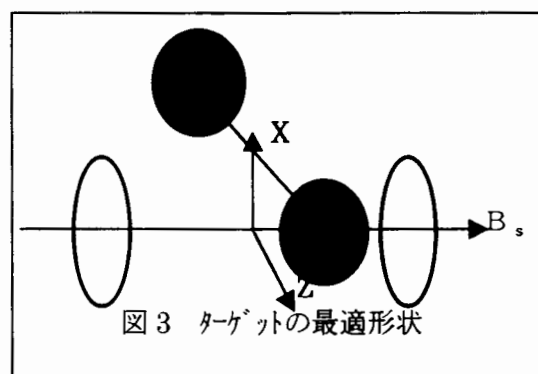


図 3 ターゲットの最適形状

### 2.2.2 既知形状の磁性体や金属の位置を求める問題

この問題も単一位置センサーを前提とするか複数センサーを前提とするかで異なる方法が考えられる。単一位置センサーを前提とする場合、3 次元的磁束密度分布の空間変化情報を単一位置センサーで得ようとする。このため、センサーから得られる情報は 3 次元的磁束密度分布の空間的変化の平均値となり、センサー配置に依存性が高い。図 2 に示す差動コイルを前提とすれ

ば、予めターゲットの位置を変更した差動コイル出力を測定し、ターゲットの位置とセンサー出力間のデータベースを構築する。ターゲットの位置とセンサー出力間の関係は必ずしも一意的な関係とはならない。すなわち、ターゲットの形状に依存して、同一センサー出力が異なる位置でも得られる。これは図2(b)と(c)で、ターゲットがx-z平面上を平行移動しても差動コイル出力が常にゼロであることから明らかである。この問題を解決するには、ターゲットに図3に示す形状のマーカを装着し、マーカの方向をx,y,z軸へ等角度45度とすれば良い。

### 2.2.3 磁性体や金属の形状と位置の両方を求める問題

この問題は、単一センサーでは磁束密度分布の3次元平均値しか得られないため、空間的に3次元形状を持つ磁性体や金属の有無は探査することができても、形状や位置を推定することは困難である。

## 2.3 基礎実験

### 2.3.1 直流磁界による基礎実験

図4に示すように馬蹄形のアルニコ永久磁石の磁極間をターゲット領域とし、磁界センサーとしてホール素子(横河電機ガウスメータ)を使用した。表1に実験に用いた器材および諸定数を示す。

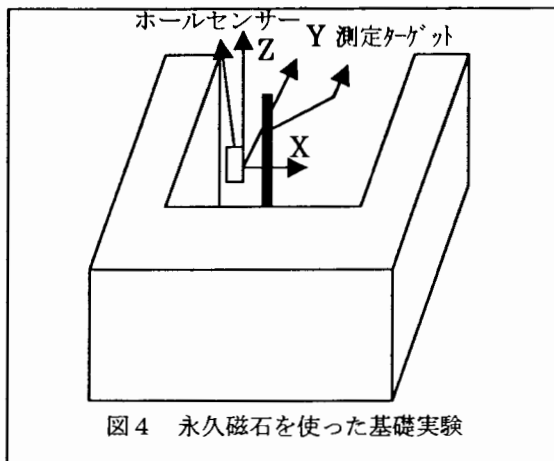


図4 永久磁石を使った基礎実験

表1. 直流磁界実験に用いた器材および諸定数

永久磁石	アルニコ馬蹄形
磁界測定	横河電機ガウスメータ
ターゲット1	くぎ：直径1.49mm、長さ1.9cm
ターゲット2	針：直径0.69mm、長さ3.9cm

図4に示すように、固定されたホールセンサーの位置を原点とするx,y,zの直交座標系を考え、x軸に沿ってターゲットを移動させて磁束密度の変化を測定し

た。結果を図5に示す。

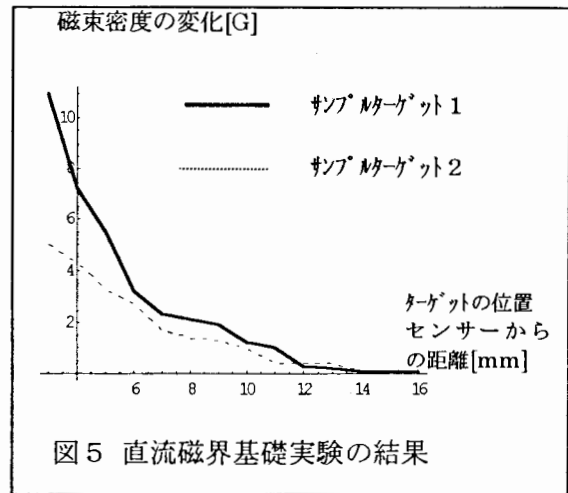


図5 直流磁界基礎実験の結果

図5の結果は、センサーが原点に近く、且つターゲットの直径が大きいほど磁束密度の変化が大きいことを示している。この結果は、理論的予測と一致する。

### 2.3.2 交流磁界による基礎実験1

図6に示すようにアクリル中空円筒にホルマル線を用いて励磁コイルと差動コイルを作成した。表2に実験に用いたコイルの諸定数を示す。

表2. 交流磁界実験に用いた諸定数

アクリル中空円筒	外径：50mm、内径：46mm
励磁コイル	左右同一仕様、直径：0.8mm ホルマル線、巻き線：50回
サーチコイル	左右同一仕様、直径：0.4mm ホルマル線、巻き線：20回
励磁電流	波形：正弦波、振幅：0.14A、 周波数12.9kHz
ターゲット1	試料：くぎ、直径：3.06mm、 長さ：6.5cm
ターゲット2	試料：針、直径：0.7mm、 長さ：3.9cm

図6に示すように、ターゲット領域の中心を原点とするx,y,zの直交座標系を考え、z軸に平行に並べたターゲットをx軸に沿って移動させ、x軸上に差動接続されたサーチコイルの誘起電圧の変化を測定した。図7に結果を示す。

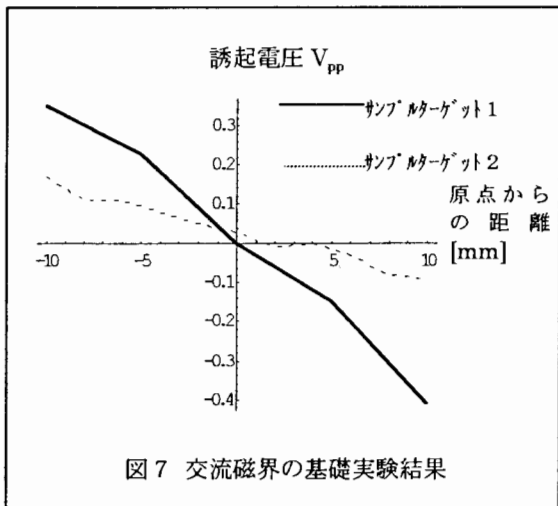
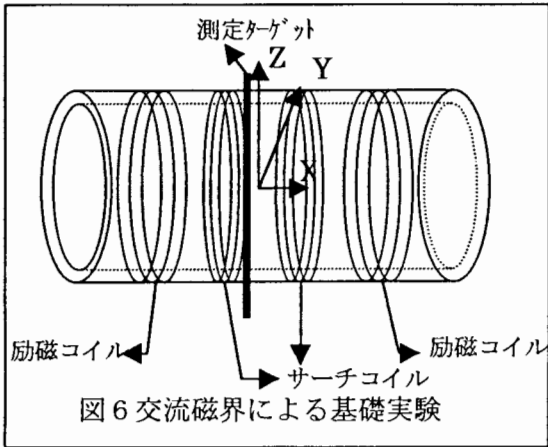


図7の結果は、サンプルターゲットの大きさ(直径)の大きいほうが高感度で測定されることを意味している。

### 2.3.3 交流磁界による基礎実験2

図6に示す実験装置を用いて実験を行った。図8に示すように両端が鉄球からなるターゲットを用いた。このターゲットの長手方向の軸の中心を、 $y, z$  軸の原点に一致させて、 $x$  軸上に並行移動させ、差動接続されたサーチコイルの誘起電圧の変化を測定した。表3に実験に用いた諸定数を示す。

表3. 交流磁界実験2に用いた諸定数

アクリル中空円筒	外径：50mm、内径：46mm
励磁コイル	左右同一仕様、直径：0.8mm ホルマル線、巻き線：50回
サーチコイル	左右同一仕様、直径：0.4mm ホルマル線、巻き線：20回
励磁電流	波形：正弦波、振幅：0.34A、 0.23A、0.11A、周波数：40 kHz
ターゲット	左右同一仕様、鉄球：直径 10mm アクリル中空円筒： 直径：15mm、長さ：20mm

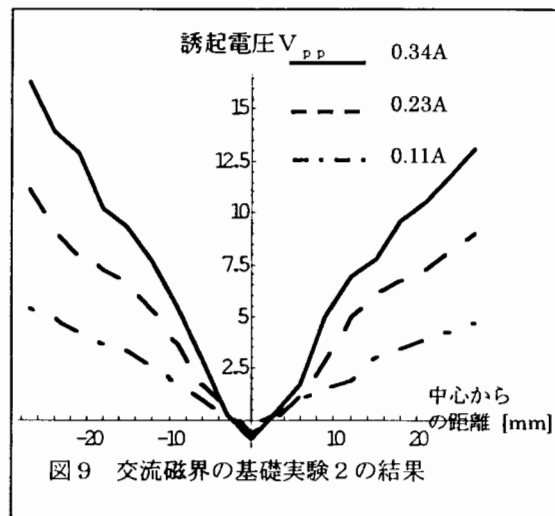
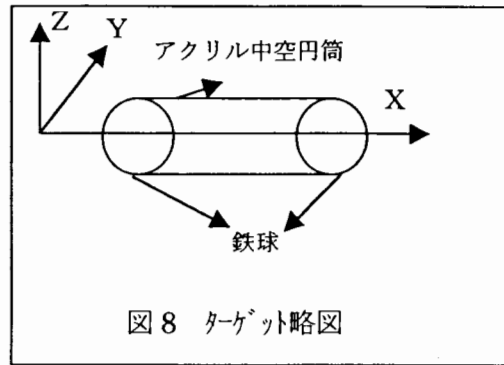
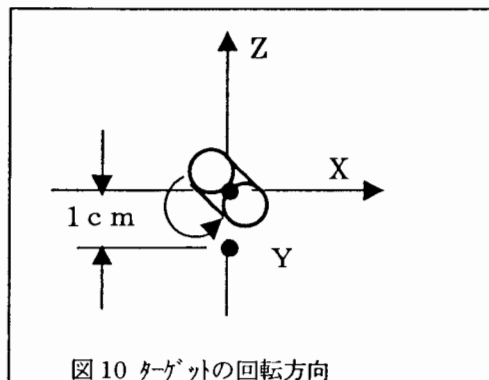


図9の結果は、励磁コイルに通電する電流に比例して、出力感度が向上することを意味している。

### 2.3.4 交流磁界による基礎実験3

図6と同様の装置を用いて実験を行った。実験に用いたターゲットは、図8と同様の形状であるが鉄球間の距離をゼロとしている。鉄球間の中心を  $x, y, z$  軸の原点へ一致させ、図10に示すように回転させても常に、差動コイルの出力電圧はゼロである。鉄球間の中心を、 $x, y, z$  軸の原点から  $z$  軸方向に1cm変化させた後、図10に示すように角度を0度から90度変化させた場合の差動コイル出力電圧を測定した。その結果を図11に示す。



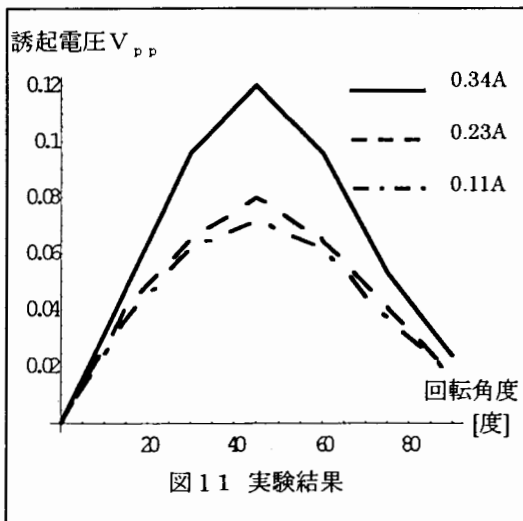


図 11 の結果から、ターゲットの長さ方向の角度を x、y、z 軸それぞれに等しく 45 度とした場合、センサー感度が最大となることがわかる。

全体の基礎実験結果を絡めると、直流磁界では永久磁石を使うことで外部電源を必要としないが、直流磁界測定のために半導体であるホール素子を使用する。この結果、ホール素子の特性が温度に敏感に反応するため、再現性のある微弱磁界の測定が困難であった。

他方、交流磁界による方法は、外部電源を必要とする反面、室温等の環境的要素に依存せず再現性のある結果が得られた。このため、交流磁界による方法はより小さい(直径)ターゲットまで測定可能であることが判明した。

### 3. まとめ

本稿では、磁気測定による磁性体と金属ターゲットに対する 3 次元探査に関する基礎理論と基礎的な検証実験を行った。その結果、磁気測定の容易さと安定性から交流磁界を用いた探査法が良好な結果を与えることを述べた。

#### 参考文献

- [1]Y. Midorikawa, J. Ogawa, T. Doi, S. Hyano and Y. Saito, "Inverse analysis for magnetic field source searching in thin film conductor", IEEE Transaction on Magnetism, Vol. MAG-33, NO. 5, Sep., 1997, pp. 4008-4010
- [2]T. Doi, S. Hyano and Y. Saito, "Wavelet solution of the inverse source problems", IEEE Transaction on Magnetism, Vol. MAG-33, NO.2, March, 1997, pp. 1935-1998
- [3]T. Doi, S. Hayano and Y. Saito, "Wavelet solution of the inverse parameter problems", IEEE Transaction on Magnetism, Vol. MAG-33, No. 2, March, 1997, pp. 1962-1965

原稿受付日

平成 10 年 7 月 24 日