

磁気センサーの開発と磁場環境測定への応用

関東職業能力開発大学校 柴田 兼敏
有限会社オメガティック 小川 博久

Development of magnetic sensor and application to
magnetic field environment measurement

Kanetoshi Shibata and Hirohisa Ogawa

要約 円筒型永久磁石とリードスイッチとを組み合わせた磁気センサーにより地磁気程度の磁気を観測することが可能である[1]。しかし、この磁気センサーで金属磁性体を検出する場合、その検出距離は15 mm程度と短い。そこで、検出距離をさらに延ばし、磁場環境測定への応用として地中やコンクリートに埋まった金属磁性体等を探知するための新しい磁気センサーの開発を試みた。この開発成果は、非接触で対象物を検出できるため、地中に埋まっている金属磁性体の検出、防犯、駐車場管理等多くの分野への応用が期待される。

I まえがき

最近、我々の毎日の生活の中で真剣に考えなければならぬ数多くの事例がある。地球環境の変化が徐々に進み、大気汚染やオゾンホール拡大等が深刻になってきているのもその一つである[2]。また、人為的行為の結果として障害をもたらす、地中に埋没されたままになっている地雷とその撤去も緊急を要する課題である[3]。これらの問題を解決する一つの手段として、磁気を高感度に検出し、磁性体の長距離検出を可能にする小型軽量廉価な磁気センサーの開発が急がれている。

本研究では、金属磁性体を出来る限り遠く離れた状態で探知することを目的に開発製作した新型磁気センサーの実験結果について報告する。次節で磁気センサーの概要を述べた後、実験装置と実験方法を述べる。次に、測定結果と考察を述べ、最後に本研究のまとめと成果について述べる。

II 磁気センサーの概要

1 リードスイッチの原理

磁気センサーは、円柱永久磁石とリードスイッチと

を組み合わせて構成されている。リードスイッチの動作原理は以下のものである[4]。

リードスイッチの構造の概観を図1に示す。リードスイッチは、強磁性体材料である52合金(Ni52% - Fe48%)の線をつぶして作られ、接点部は厚さ数ミクロンの金メッキやロジウムメッキが施されている。これをガラス管の中に2本のリード電極として封じ込めた極めて簡単な構造をしたスイッチである。ガラス管内を不活性ガスで充填していることにより、温度や湿度、腐食ガスなどによる外部の影響を受けにくい。このリードスイッチの最大の特徴は、外部からの磁界の変化だけでスイッチをON-OFFできることであり、他のスイッチで必要とされるON-OFFのための電力を考えなくてもよいことである。すなわち、リードスイッチは、金属磁性体等を近づけることによりリードにN極とS極が誘導され、この磁気吸引力により作動する。磁界が除かれるとリードの弾性により接点が復旧し回路が開くという原理で構成されている。

2 磁気センサーの構造と機能

電磁コイルを取付けた磁気センサーの構造と磁力線

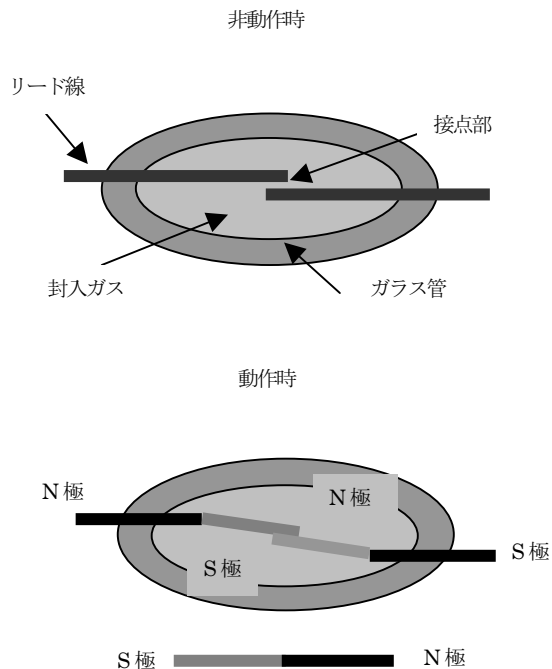


図1 リードスイッチの動作原理

の概略を図2に示す。非磁性体金属パイプの先端部に円柱型永久磁石を固定し、その中心軸上に適切な距離を置いてリードスイッチを対向させ固定する。リードスイッチのリード片は、曲げ加工を行い、リード片の両端には耐熱電線を半田付けする。リードスイッチの全体を絶縁チューブで覆い、その上下にパイプの内径よりもやや細い絶縁カラーを取付ける。永久磁石から立体的に出ている閉曲線状の磁力線が、金属磁性体の接近により変形し、その結果としてリードスイッチのリード片近傍の中心軸方向の磁力線の密度に変化が起きる。磁気センサーは、この磁力の変化をON-OFFの電気信号として取り出す。従来のリードスイッチは、永久磁石とリードスイッチを一体化して使用しないで、運動部品に永久磁石を固定し、静止部品にリードスイッチを固定し、永久磁石を固定した運動部品を何回もリードスイッチに対して遠近運動させるという、主として計数用に利用されてきた。筆者等は、永久磁石とリードスイッチを中心軸上にある間隔をおいて固定した磁気センサーを考案して磁性体金属の存在の有無を感知するセンサーを製作し測定を試みた。しかしながら検出距離が15mm程度であるため応用範囲が限られていた。そこで、リードスイッチと永久磁石の間と前後に電磁コイルを挿入して、これに一定のパルス信号を加えて永久磁石の磁力線に能動的に変形を与え、リードスイッチのON-OFF信号に発振周波数の

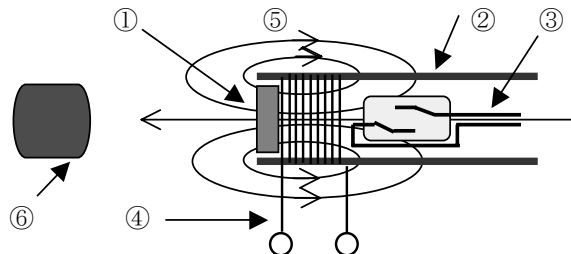


図2 電磁コイル付磁気センサーと磁力線
①永久磁石 ②非磁性体金属パイプ ③リードスイッチ
④電磁コイル ⑤磁力線 ⑥被金属磁性体

変化が現われてくる構造とした。

III 実験装置と実験方法

図3は、ホール素子測定子、磁気センサーを含む測定装置の概略を示す。磁気センサーとホール素子測定子は測定台に取付けられており、これらは別々に軸(x)方向とそれに垂直な縦(y)方向に移動可能である。ホール素子で測定される磁束密度は軸方向成分(B_x)である。この磁束密度をy方向のある位置にホール素子を固定した後、ホール素子をx=0mmから数10mmまで50 μ m毎に測定した。磁気センサーの被測定対象の測定台はmm単位で数10cmまで移動可能である。

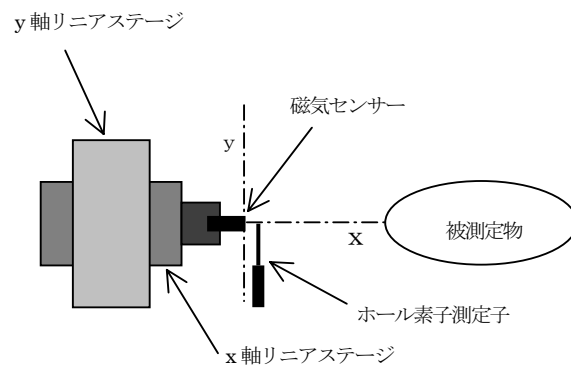


図3 測定装置の概略図

3種類の円柱永久磁石(フェライト、アルニコ、サマリウムコバルト)の基本特性、従来型の磁気センサーおよび開発した電磁コイル付磁気センサーの磁束密度分布を電磁コイルに入力する矩形波パルスの周波数や波高値等の実験条件を変化させて測定した。また、被測定対象として金属磁性体を用いて検出距離を測定した。

IV 測定結果および考察

図4は、磁気センサーに用いた3種類の永久磁石

(5mmΦ、3mm)から発生する磁束密度の空間分布である。永久磁石の中心(y = 0)において、磁石表面をx = 0 mmとしてx方向にホール素子を移動し、空間磁束密度の減衰を測定した。磁束密度は磁石表面から離れるにしたがって指数関数的に弱くなる基本特性を示すことが理解される。同図からサマリウムコバルト磁石の磁場が他の試料に較べて大きいことがわかる。次に、フェライト、アルニコ磁石の順になっている。サマリウムコバルト磁石の磁性が強い理由は、保持力、残留磁束密度、最大エネルギー積などの磁気特性が他の磁石より優れていることによると考えられる。

磁束密度分布が指数関数的に減少していると観測されることから、実験値を基に実験式を算出した結果が同図に実線で示されている。

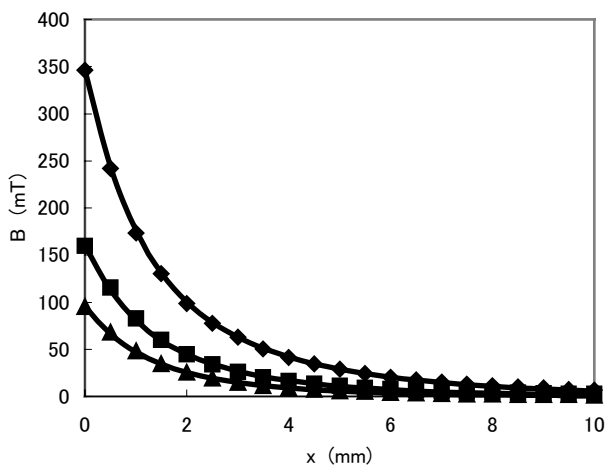


図4 標準磁石の磁束密度分布特性(y=0)
 ◆ : サマリウムコバルト ■ : フェライト
 ▲ : アルニコ

それぞれの実験式は、

サマリウムコバルト磁石：

$$B = 17.8e^{-x} + 387.4e^{-0.28x}$$

フェライト磁石：

$$B = 107.1e^{-x} + 74.7e^{-0.33x}$$

アルニコ磁石：

$$B = 61.1e^{-x} + 33.9e^{-0.36x}$$

のように表わされる。

図5は、フェライト磁石を試料として基礎的な磁石自身の磁束密度を測定した結果を示す。磁石の円周方向各位置での空間磁束密度の減衰を示している。磁石表面から離れるにしたがって、また、垂直方向に距離が遠くなるにしたがって磁束密度が弱くなる基本特性

を示している。y = 2 mm における特性では、磁束密度が x = 0.5 mm の位置で最大値を示し、その前後では指数関数的に増減を示す分布になっている。これは、

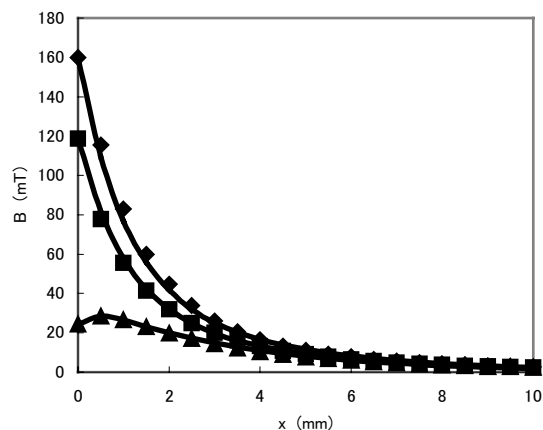


図5 フェライト磁石の磁束密度分布特性
 ◆ : y = 0 ■ : y = 1 mm ▲ : y = 2 mm

ホール素子測定子が直径5 mmの円柱磁石の端部であるy = 2 mm の位置に設置されていることから、N極からS極へ向かう磁力線の折れ曲がりによる密度勾配が絡み合う結果によると考えられる。測定値を基に求めた実験式が同図に実線で描かれているが、それらの式は、

$$y = 0 \text{ mm} : B = 124.37e^{-x} + 35.63e^{-1.98x}$$

$$y = 1 \text{ mm} : B = 87.7e^{-x} + 31.0e^{-0.26x}$$

$$y = 2 \text{ mm} : B = -1.38e^{-x} + 25.73e^{-0.24x}$$

のように表わされる。

図6は、フェライト磁石に電磁コイルとリードスイ

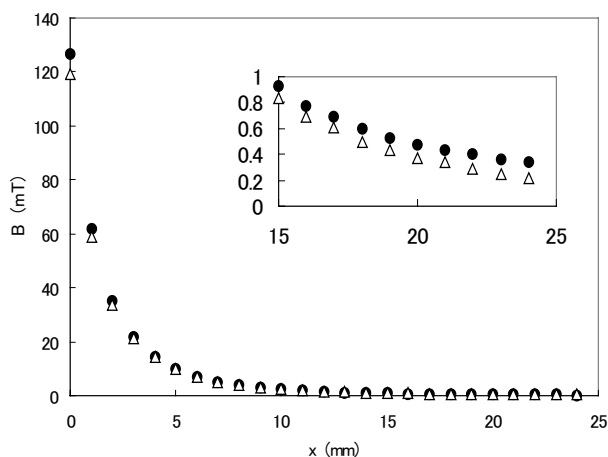


図6 電磁コイル付磁気センサーの磁束密度分布
 ● : 112Hz, 1.3V △ : パルス無し

ッチを組み合わせた新型電磁コイル付磁気センサーによる磁束密度測定結果を示す。矩形波パルスを印加しない場合と矩形波発振回路の出力パルス(112Hz、1.3V)を入力した二つの場合の空間磁束密度分布を示す。実験は $y = 0$ mmの位置で、 x 方向にホール素子測定子を移動して行われた。磁束密度は、電磁コイルにパルスを印加した場合が、印加しない場合よりも大きい。その差は $x = 0$ mm近傍で7.43 mT程度であり、 $x = 24$ mm で0.10 mTである。そこで、電磁コイルへ入力したパルスにより近傍の磁場がどの程度変化するかを以下に検討する。

電磁コイルは、抵抗と誘導性リアクタンスを直列に接続した等価回路で表わすことができる。したがって、回路方程式は

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E \quad (1)$$

で示される。Lはコイルのインダクタンス、Rは抵抗、Eは矩形波パルスの波高値、iはコイルを流れる電流である。

初期条件

$$t = 0 : i = 0 \quad (2)$$

の下で式(1)を解くと、

$$i = \frac{E}{R} \frac{1 - e^{-2naT}}{1 + e^{-aT}} e^{-\alpha(t - (2n-1)T)} \quad (3)$$

ただし、 $(2n-1)T < t < 2nT$

$$i = \frac{E}{R} \left[1 + \left\{ \frac{1 - e^{-2naT}}{1 + e^{-aT}} e^{-aT} - 1 \right\} e^{-\alpha(t - 2nT)} \right] \quad (4)$$

ただし、 $2nT < t < (2n+1)T$

が得られる。

ここで、 $\alpha = R/L$ 、Tは矩形波の周期であり、nは正の整数である。

本実験で使用した電磁コイルは、直径30 mm、長さ30 mm、巻数180回の有限長ソレノイドである。コイルの定数 $R = 3.83 \Omega$ 、 $L = 663 \mu\text{H}$ および印加した矩形波の波高値 $E = 1.3 \text{ V}$ 、周期 $T = 8.9 \times 10^{-3} \text{ sec}$ を上式に代入することにより、 $i \approx 0.34 \text{ A}$ を得る。コイルを流れるこの電流により永久磁石を含むコイル周辺に磁場が生成されるが、その強さはビオ・サバールの法則

$$H = \frac{Ni}{2l} (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) \quad (5)$$

より得ることができる。Nはコイルの巻数であり、 θ_1 および θ_2 は、図7に示す角度である。以上の計算から、電磁コイルに印加した矩形波パルスによってコイル端部には $B = \mu_0 H$ を用いて約15 mT 程度の磁束密度が生成されることがわかった。

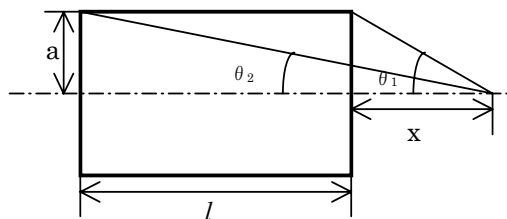


図7 ビオ・サバールの法則により軸上の磁場を求める

ところで、図6の測定結果は、図8(a)に示した円柱永久磁石の軸上に隣接した電磁コイルへの矩形波パルス有無の場合のx軸上の磁束密度を示しており、矩形波パルスを印加した場合に $x = 0$ mm付近で7.43 mTの増加があった。そこで、電磁コイル端部から7.43 mTの磁場が形成される軸上の位置を求めると7.2 mmと計算された。実験が行われた測定子($x = 0$ mm)、円柱永久磁石(3 mm) および隣接して配置された電磁コイル端部までの距離は約7 mmであった。このことより、計算値と実測値はほぼ一致していると考えられることができる。

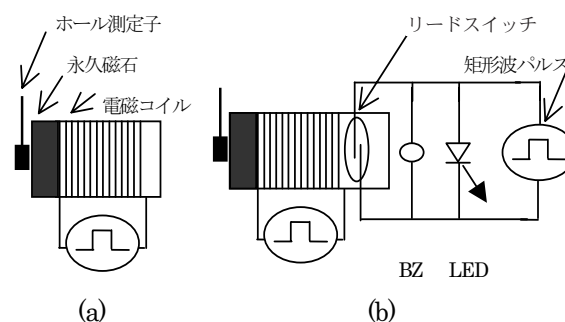


図8 磁気センサー測定概略図

表1は、図8(b)の測定概略図に示す回路による測定結果を示したものである。この実験は、遠方にある金属磁性体を検出するための予備実験として行われた。リードスイッチには矩形波パルス(5.8 V、90 Hz)が印加されている。金属磁性体等の異物が周辺に存在しない通常の場合には、このリードスイッチと並列に接続されているLEDが点灯し電子ブザーが鳴っているが、金属磁性体等を近づけることにより(この実験では、電磁コイルに矩形波パルスを印加してリードスイッチ周

辺の磁場を変動させることで代用した)永久磁石の両端から立体的に出ている閉曲線状の磁力線に対して能動的に変化を与え、その結果としてリードスイッチへの磁力の変化をリードスイッチのON-OFFの電気信号として取り出す。すなわち、磁力の変化でリードスイッチがONしたときLEDが消灯し電子ブザーが止み金属磁性体等の存在を知らせることになる。実験は電磁コイルに矩形波パルスの波高値を1.3 Vとし、周波数を3種類変えて印加した場合と、矩形波パルス印加しない場合とで行われた。磁石表面の $y = 0$ mmでx軸上の位置を変えて空間磁束密度の測定が行われた。

表1 x軸上における磁束密度($y = 0$ mm)

x(mm)	矩形波パルス(Hz)	磁束密度 B(mT)
0	無し	118.91
	1	119.91
	5	120.19
	10	120.62
	50	121.23
5	無し	9.77
	1	9.82
	5	9.82
	10	9.85
	50	9.86
10	無し	2.46
	1	2.49
	5	2.49
	10	2.49
	50	2.49

表1に示した実験結果からは、周波数を数種類変化させても磁束密度に顕著な違いは現れないが、電磁コイルにパルス印加しない場合に磁束密度が弱いことを確認できる。 $x = 0$ mmにおいて1.00 ~ 2.32 mT、 $x = 5$ mmにおいて0.05 ~ 0.09 mT、そして $x = 10$ mmにおいて0.03 mTの差である。この低周波弱磁場の変動をリードスイッチが捉えることにより、周辺の金属磁性体等の異物を検出することにつながると考えられるが、これに関連するさらに詳細な考察が後述する図10の実験結果に基づいてなされた。

図9は、電磁コイル付磁気センサーを用いて金属磁性体を検出した測定結果の一例を示したものである。これより、電磁コイルに入力する矩形波パルスの周波数が低いほど、また振幅が小さいほど検出距離が延び

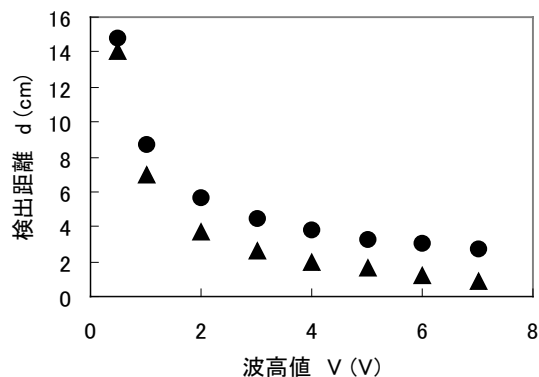


図9 検出距離の矩形波波高値依存性

● : 40Hz ▲ : 100Hz

ることがわかる。

この図は、金属磁性体の接近により、磁気センサー周辺の磁場が強められる形で歪められ、誘導磁界による変化でリード電極が接触してONになった結果、ブザー音が消え磁性体を探知した結果として示されている。図から明らかなように、従来の磁気センサーによる金属磁性体の検出距離が15 mm程度であったのに対し、本研究で開発した電磁コイル付磁気センサーによる検出距離は約15 cmで大幅に延ばす成果が得られているが、その物理的理由は確定出来ず、詳細は今後の課題である。现阶段で考えられる理由の一つは、磁力線から発生する低磁気非調和波が縦波的に進行し、障害物のない空気中では減衰するが、金属磁性体等の障害物の存在により反射するために検出されたと考えられる。また、円柱永久磁石とリードスイッチからなる従来の磁気センサーの適切な位置に電磁コイルを取付け、矩形波パルスを入力するようにしたことにより磁気センサーを含む周辺に形成された変動磁場が永久磁石の磁力線に重畳されて遠くへ達したと考えられる。この磁力線が、磁化された金属磁性体との微弱な磁場と相加結合することにより延びた磁力線を形成する。その効果がリードスイッチを動作させる結果につながると考えられる。ただし、リードスイッチが作動して磁性体を検出するためには、磁力線が金属磁性体側に延びると同時にリードスイッチをONさせるだけの磁場の変動が必要である。リードスイッチは、このような現象が起こる結果として動作していると考えられる。金属磁性体を検出されたとき、磁気センサー周辺に磁場の変動があるかどうかを確認するための実験が次のように試みられた。

図10は、電磁コイル付磁気センサーに組込まれた

リードスイッチの作用により金属磁性体を検出したときの $x = 0$ mmにおける磁束密度と、周囲に磁性体が存在しないときの $x = 0$ mmにおける磁束密度との差を ΔB としたときの測定結果を●印で示したものである。また、▲印は、同じ条件で金属磁性体に接近して置かれたホール素子測定子を用いて測定した磁束密度の差を示す。図より、金属磁性体が発見されるときは、

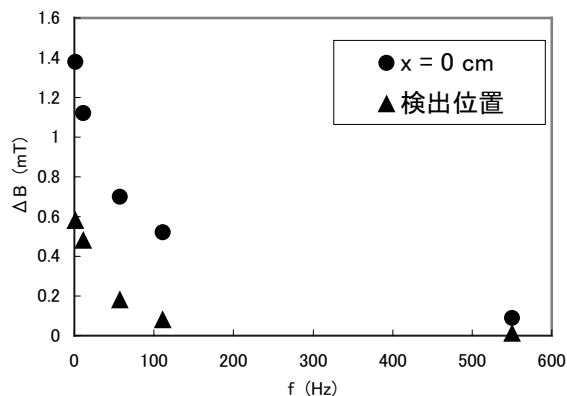


図10 金属磁性体検出時の磁束密度変化量

磁気センサー周辺の磁束密度に変化が現われることが理解される。その変化は、周波数が低いほど大きい傾向にある。また、金属磁性体周辺においても微弱な磁場の変動が観測される。この現象は、以下のように考えることができる。

磁気センサーの永久磁石と電磁コイルに流れる矩形波パルスによる磁力線が金属磁性体に近づくにしたがって少しずつ延びるという現象を考えることができれば理解しやすい。この現象を理解するために筆者等は、電磁電流は磁石であるという概念の基に、磁気センサーと磁性体との間の磁力線が相加結合するメカニズムについて、環状電流により生成される軸上の磁場をビオ・サバルの法則を用いて数値計算した結果から類推することを試みた。

図11は、2個の環状コイルを考え、一方の左端コイルにのみ直流電流を流したときのx軸上の磁束密度と、他方の右端コイルの両方に電流を流したときの磁束密度の変化の様子を示した数値計算結果の一例である。右端コイルがないときの $x = 0$ mにおける磁束密度が34.9 mTであるのに対し、 $x = 1$ mの位置に右端コイルを置いた結果、このコイルに流れる電流によって形成される磁場が左端コイル周辺に変動をきたし、 $x = 0$ mにおいて37.3 mTに相加されていることがわかる。右端コイルを左端コイルに近づければその値はさらに大きくなり、逆に遠ざければその差は小さくな

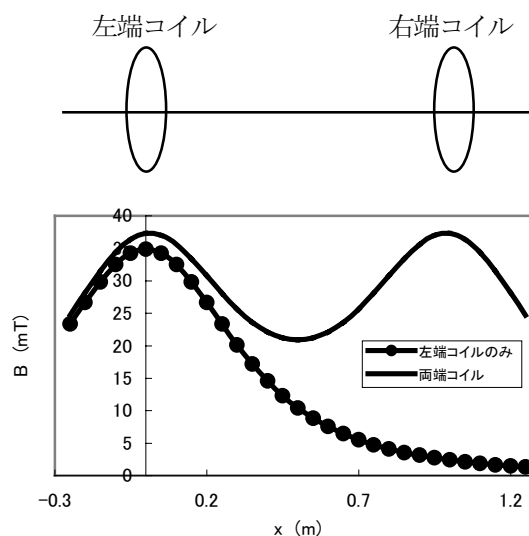


図11 環状電流による軸上の磁束密度分布

る。金属磁性体が磁気センサーに近づくにしたがって僅かずつセンサー周辺に形成されている磁場が変動し、ある値以上の磁束密度が相加されたときN-S極に磁化されたリードスイッチの強磁性体リード片が動作して金属磁性体の存在を検出することにつながると考えられる。

このようにヘルムホルツコイルにより相加結合した磁力線が形成される現象は、磁気センサーにより遠方に金属磁性体や矩形波を入力した電磁コイルが存在する場合にも同じように見出せるであろう。そこで、図12に示すように、電磁コイル付磁気センサー（実験のためにリードスイッチを使用していない）と電磁コイルを50 mm離して対向させ、その間の磁束密度の測定を試みた。その結果が、図13に示されている。

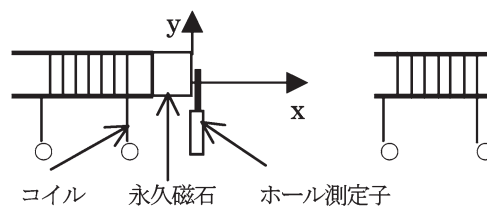


図12 遠方に電磁コイルがある場合の磁束密度測定

図13の●印は、電磁コイル付磁気センサーのコイルのみに7.6 V、20 Hzの矩形波パルスを入力して測定したx軸方向の磁束密度であり、▲印は、磁気センサーのコイルと遠方の電磁コイルの両方に20 Hzの矩形波を入力した場合の磁束密度分布を示す。図より、x軸方向に遠ざかるに従って次第に小さくなる前者の磁束密度が、後者では15 mm付近で最小になり、そ

の後電磁コイルを設置した18.5 mmまで増えていることが理解される。すなわち、図1-1に示したヘルムホルツコイルに流れる電流により形成される磁場が相加結合されたと同様に、磁気センサーの電磁コイルと遠方に置かれた電磁コイルにより形成される磁場も相加結合されることがわかる。

これと同様の原理で、磁気センサーは、そこから遠く離れた場所にある金属磁性体の磁化作用により、金属磁性体の近傍で磁場が僅かに強まり磁力線が延びる形で強められた磁場の大きさによってリードスイッチが磁化されて作動すると考えられる。

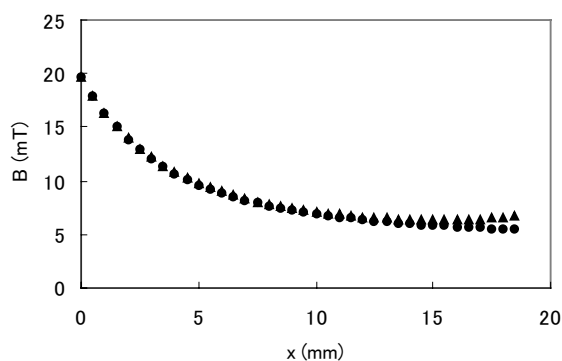


図1-3 遠方電磁コイル有無の場合の磁束密度分布
●：電磁コイル無し ▲：電磁コイル有り
コイルに入力した矩形波周波数：20 Hz

V あとがき

円柱永久磁石とリードスイッチからなる従来の磁気センサーでは、金属磁性体等を検出する距離が15 mm程度に制限されていた。本研究は、従来の磁気センサーに改良を施し金属磁性体等の検出距離を大幅に延ばすことを目的に進められた。開発された新型の小型電磁コイル付磁気センサーは、従来の磁気センサーの同軸上に電磁コイルを付加したものである。このコイルに低周波矩形パルスを印加することにより、永久磁石から発生している磁場に重畳する形でセンサーの周囲に低周波弱磁場が形成される。磁場を形成する磁力線は、電磁コイルに低周波数の矩形波を入力したときに遠くまで延びることが実験を通して確認された。この磁場の大きさは、数10 μ Tで地球磁場の大きさ程度であるが、遠方に延びた磁力線と金属磁性体の周囲の弱い磁力線とが相加結合することによりリードスイッチ周辺に変動弱磁場の変化が現われ、強磁性体リード片が磁化されることによりセンサーが駆動するというメカニズムを導くことができた。

検出距離は10 cm以上に及ぶことが確認された。こ

の開発成果は、今後小型廉価高精度センサーとして製造可能であることが期待でき、金属磁性体の検出に応用できると考えられる。また、防犯、駐車場管理、自動車の通過台数の計数、カードリーダー等への応用も期待される。

謝 辞

本実験を遂行するための装置作成にあたり、本学生産技術科菅野金一先生、浦辺義明先生にご協力いただきました。厚くお礼申し上げます。この研究は、事業主団体研究開発事業による助成金で行われた。

参考文献

- [1] 小川博久 「実践教育」 Vol.13, No.2 1998年
- [2] 国立環境研究所 「ILAS-IIによる今年の南極オゾンホール観測結果」
- [3] 文部科学省資料 「対人地雷探知・除去技術の研究」
- [4] 例えば、株式会社沖センサデバイス、株式会社マコメ研究所 「技術資料」
- [5] 柴田兼敏 他 「磁気フィールドセンサーを応用した金属探知器の開発と応用」 第8回関東ポリテックビジョン p82 ~ 83 2004年2月

