

- 実施ボーリング地点
- 調査すべき磁気反応箇所

事後の調査で
L=250mm, φ12mmの鉄筋
深さ0.7mであったと確認

事後の調査で
L=150mm, φ12mmの鉄筋
深さ0.5mであったと確認

水平磁気探査結果コンタ図 (Z Bot-Z Top)



1. 水平探査

井戸Aを中心とした10m四方に区域ついて、地表面より水平磁気探査及びレーダ探査を実施し比較的浅い部分についての汚染源となりうる埋設物の調査を実施した。水平磁気探査では汚染源(鉄類)の有無、レーダ探査では水平磁気探査では検知できない非鉄製の物体の有無をそれぞれ調査した。

1.1 レーダ探査の原理

レーダ探査の手法は電磁法に分類されるが、測定方法からすると高周波のレーダ波による反射法探査と考えると分かりやすい。送信アンテナから地中に放射された電磁波は、透過、屈折、反射、回折などの現象を起こしながら、その一部が地中の物性が異なる境界で反射し地表に戻ってくる。これを受信アンテナでとらえる。送信アンテナと受信アンテナを一定間隔に保ちながら測定を行えば、シングルチャンネルの音波探査とよく似た測定方式である。送信アンテナと受信アンテナが一体型であるものが多い。

レーダ波の伝播時間は、反射境界の深度と途中の物性値(比誘電率)との関数である。地中の比誘電率を一定と仮定すれば、深度は伝播時間に比例するので、測線方向に電磁波波形を並べれば時間断面図が表現できる。レーダ探査の記録では、反射波の振幅の大きさと土の極性によってカラー分類し、反射波の連続性を追跡しやすくしている。例えば、両極性表示では信号の最大強度の強い方から、正極性側では白、赤、マゼンダ、黄色、黒(0)とし、負極性側では、白、緑、シアン、青、黒(0)のような色を使っている。反射強度が強い場合には、地中に比誘電率のコントラストが強いものが存在することを意味しており、反射波群の示す形状、深度、大きさなどから、埋設物や地中の状況を解釈する。

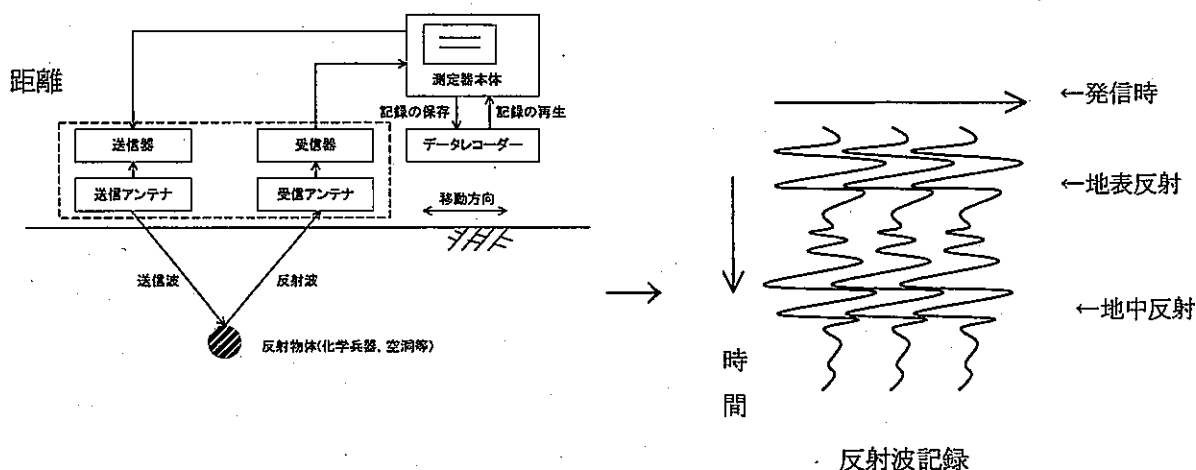


図 1.1 レーダ探査の反射波記録

地中の反射面の深度 D (m) は、レーダ波の伝播時間 T (s) と物体の比誘電率 ϵ から次のように求められる。

$$D = \frac{3 \times 10^8}{2} \cdot \frac{T}{\sqrt{\epsilon}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

おもな物質の比誘電率 ϵ は表 3.1 のとおりである。

表 3.1 各物質の比誘電率 ϵ

物質	ϵ	物質	ϵ
空気	1	淡水飽和粘土	8~12
淡水	81	ローム	30~36
海水	81~88	平均的表土	16
淡水氷	4	花崗岩	5~8
海水氷	4~8	石灰岩	7
乾燥した砂	4~6	コンクリート	5~10
淡水飽和砂	30	アスファルト	2.7
淡水飽和シルト	10		

一般に地中の物質構成は不均質であり、乾燥と湿潤の状況でも比誘電率は大きく変わる。原位置で比誘電率を直接知ることは難しいので、地盤の種類によって経験的に比誘電率を仮定するか、深度が既知の埋設管や埋設物をスケールして、時間を深度に変換する方法をとることが多い。レーダ波の伝播速度は速いので通常 ns (ナノ秒: 10^{-9} s) の単位が使われる。比誘電率を 25 とすれば、(1)式より深度変換係数を 3cm/ns とすればよい。反射波が 20ns の位置にあれば、深さは 60cm である。

地中に金属物があれば、比誘電率のコントラストが大きいため強い反射波となり、発見が容易である。ただし、深部ほど発見が困難となり、対象物がある程度の大きさを伴わないと発見できない場合がある。

1.1.2 レーダ探査方法

レーダ探査の範囲は井戸 A を中心とした 10m 四方の範囲とし、探査測線は 1m 間隔に配置することを基本とした。

測定は、レーダアンテナを地表面で測線に沿って移動させ、連続的にレーダ波を送受信して反射波を本体に記録する。アンテナの送信周波数は、200MHz を用意した。測定データは、本体の液晶画面にリアルタイムで表示されるので、最適な記録を得られる測定パラメータを調整する。現場の地盤条件はほぼ同じと考えられるので、測定パラメータの調整は最初の試験測定時に決定し、以後は同じ測定パラメータを用いる。測定データは本体のハードディスクに収録さ



写真 1.1 測定状況(路面下空洞調査)

れるので、必要な記録は現地で液晶画面に再生ができる。

測定終了後には測定データをPCに転送してバックアップを取るとともに、必要があれば専用処理ソフト“RADAN”によりノイズ除去などの後処理を行なう。写真1.1, 1.2にレーダ探査状況を、図1.2に記録例を示す。

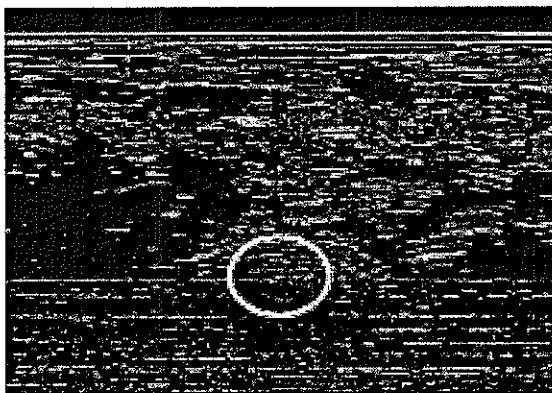


図 1.2 SIR-2000 記録例 (アンテナ 200MHz)
白い楕円は深度 1.7m 付近の異常箇所。
掘削確認の結果、空洞と確認された。



写真 1.2 レーダ探査機 SIR-2000
(左)本体 (右)200MHz アンテナ

1.2 水平磁気探査

(1) フラックスゲート磁力計の原理

フラックスゲート型磁力計のセンサは、高透磁率磁性材料でできたコア（鉄芯）に一次および二次コイルが巻かれたものである。一次コイルに交流を流すことによってコアを励磁して外部の直流磁界によって生じる二次側の出力電流から磁界強度を求めるのが一般的な原理である。

まず、鉄芯に一次コイルと二次コイルを巻いて、図 1.3 のような一種のトランスを考えることにする。トランスとは一次コイルに変化電流 I を流して、鉄芯中に磁束 ϕ を発生させ、その ϕ の変化によって二次コイルに誘導電圧 E を発生させるものである。鉄芯の断面積を S とすると、磁束密度 B は ϕ/S である。この B は磁化力 H によって鉄芯が磁化したことによって生じたもので、その H の源が電流 I である。

H と B との関係は鉄芯の磁気特性によって規定される。鉄芯としてパーマロイのように透磁率が非常に高く、小さな場でも容易に B が飽和される材料を用いる（図 1.4）。

電流 I を周波数 f の交流（正弦波）とすると、 H も同様な正弦波形となる。 B も基本的には周波数 f で変化するが、この際 B の正負のピークは飽和してややつぶれるように H の振幅を調整しておく。この鉄芯に地球磁場（特に H_0 とする）がさらに加わると、その分だけ鉄芯中の磁場は一方にかたよる（同図(b)）。これによる B の波形は片側のピークが強くつぶれて非対称なものとなる（同図(c)）。この非対称性（歪）の度合を検出することで H_0 を測定する。非対称性の目安として、そこに含まれる $2f$ 成分の正弦波の振幅を用いる。

その意味を同図(d)で解説する。すなわち、 f と $2f$ の 2 種の正弦波形（実線）を図のように配置して加えあわせると、点線のように 正のピークは低下し、負のピークは絶対値としては大きくなる。波形の非対称性が強まるほど（ H_0 が大きいほど）、 f 成分に対する $2f$ 成分の比は大きくなる。

二次コイルの誘導電圧は当然 $2f$ 成分も含んでいる。この振幅（電圧）を適当なフィルタを通して検出し、実験的に定まる係数を乗じると磁場の強さ H_0 が得られる。このような原理で磁場 H_0 を求めるのがフラックスゲートセンサである。

このような飽和鉄芯型磁力計では、鉄芯の軸方向の磁場成分を測定できるため 3 個の磁力計を 1 組にして 3 成分測定することも可能である。

今回使用する水平磁気探査機は、鉛直方向に約 0.5m 離れた位置に 2 組の 3 成分磁気センサがそれぞれ取り付けられているため、各成分の測定ならびに磁気傾度も測定可能である。埋没している磁性体を探査する場合、 Z 成分の傾度（Gradient- Z ）を測定することが有効であるため、測定結果には磁力 Z 成分の傾度変化を磁気異常マップとして示すことにする。

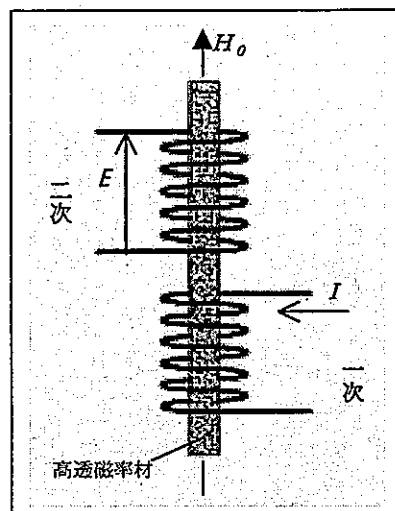


図 1.3 磁力計の原理

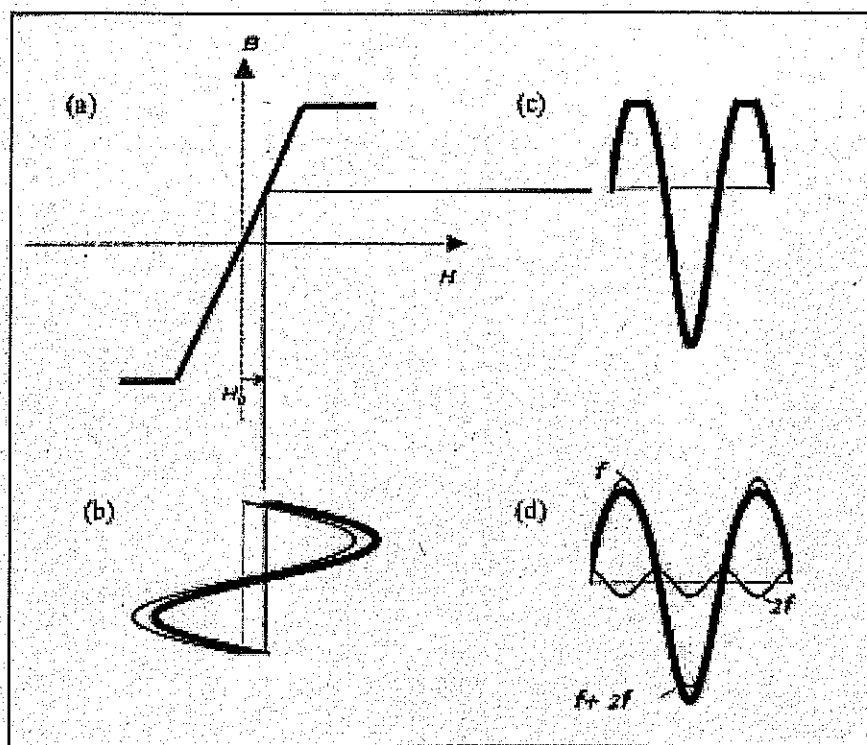


図 1.4 パーマロイの B - H 曲線と交流磁場の波形