

# 地下埋設物探査システムの研究（その2）

——地下レーダー探査実験——

西林清茂 上野孝之  
仮谷幸吉

## Study on Underground Exploration System (Part 2)

—— Detection of Buried Object by Ground Probing Radar ——

Kiyoshige Nishibayashi Takayuki Ueno  
Kokichi Kariya

### Abstract

The authors conducted many experiments by ground probing radar to discern the materials, shapes, and sizes of objects buried in the ground. The following results were obtained with these experiments: (1) reflections from the buried object have similar patterns as obtained theoretically according to shape, (2) it is difficult to discern the size of an object under 20 cm, (3) the reflectance of an electromagnetic wave is in proportion to the electrical character and area of reflection surface of the object.

### 概要

地下レーダーの反射映像から地中に埋設されている物体の材質、大きさなどを判別する技術の研究として、土槽に種々の物体を埋設して探査実験を行なった。実験の結果つぎのことが明らかとなった。

(1) 埋設物の反射映像は計算によって求められる固有のパターンに比較的よく一致する。(2) 断面寸法が20 cm以下の埋設物は大きさの区別が困難である。(3) 受信される電磁波反射強度は埋設物の電気的性質および反射面積に関係する。

#### 1. まえがき

近年、電波を利用して比較的浅層部の種々の埋設物を、地表面から調査する試みが行なわれている。電波探査は10 MHz～1GHzの帯域の電磁波を用い、土と物体の電気的性質の相異によって生ずる両者の境界面からの反射波をとらえ、反射波到達の時間差あるいは位相差を計測して物体の存在を検知する。電波探査法は地下レーダーと呼ばれ、

- (1) 取扱いが比較的容易である。
- (2) 非鉄金属でも探査可能である。
- (3) 電波の伝搬速度が早く、短時間で広範囲の探査が可能である。

などの利点を持つ。しかし、

- (1) 土質などによって探査能力が大きく左右される。
- (2) 地中のすべての物体から反射するので、識別に多くの経験が必要とする。

などの問題や課題がある。

この研究では、地下レーダーの反射波の複雑な映像から埋設物の材質、大きさなどを判別する技術を向上させるために、土槽に種々の物体を埋設して探査能力の実験を行なった。実験はGSS社製地下レーダーを用い、材質、断面形状、寸法をパラメータとした合計48種類の埋設物について行なった。測定結果と理論的に得られる物体の反射映像パターンとの比較を行ない、この探査法の適用範囲を検討した。

## 2. 探査原理と装置の概要

地下レーダーは電磁波を利用した反射法探査装置であり、図-1に示すように、送・受信アンテナ、アンテナ駆動と信号処理のためのコントローラ、記録装置で構成されている。

送信アンテナから数 ns のパルス状の電磁波を地中に向けて放射し、電気特性（透磁率、誘電率、導電率）が異なる物質の境界で生じた反射波を受信アンテナでとらえる。

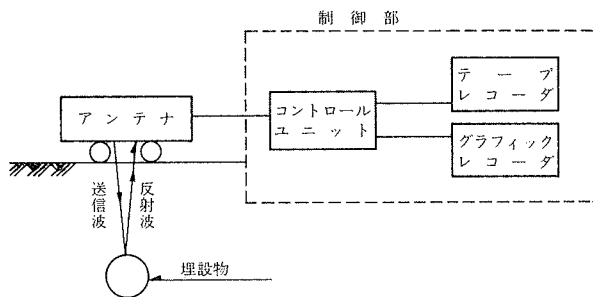


図-1 地下レーダーシステム概要

電磁波の送信電力に対して物質の境界で反射してもどる受信電力  $P_r$  は近似的に次式で示される。

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot L_T \cdot S_o \cdot L_R \cdot G_p \cdot L_p \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $G_t$ 、 $G_p$ ：送・受信アンテナ利得、 $L_T$ 、 $L_R$ ：送・受信アンテナと大地との結合損失、 $S_o$ ：地中の物体のレーダー反射面積、 $L_p$ ：地中における電波の伝搬損失、 $\lambda$ ：電波の波長、 $R$ ：アンテナから物体までの距離

地中における電波の減衰は近似的に次式で示される。

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $\sigma$ ：地盤の導電率、 $\mu$ ：地盤の透磁率、 $\epsilon$ ：地盤の絶対誘電率

電磁波の地中伝搬速度は近似的に次式で示される。

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $\epsilon$ ：地盤の絶対誘電率、 $\epsilon_r$ ：地盤の比誘電率、 $C$ ：真空中の電磁波の速度（ $\approx 3 \times 10^8$  m/s）

地表から物体までの距離  $L$  は電磁波の往復時間  $t$  から次式で示される。

$$L = \frac{1}{2} v \cdot t \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $v$ ：電磁波地中伝搬速度

実験に使用した地下レーダーのアンテナの仕様を表-1に示す。アンテナおよび制御装置を写真-1および写真-2に示す。

送受信ダイポールアンテナ
送信波：2ns インパルス
周波数帯域：10~700MHz (中心周波数 300MHz)
繰返し周波数：50KHz
印加電圧：40V

表-1 アンテナの仕様

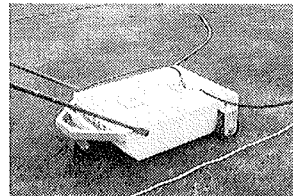


写真-1 アンテナ

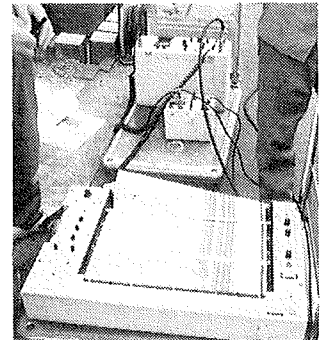


写真-2 制御装置

## 3. 実験方法

### 3.1. 埋設物

材質・形状・寸法と地下レーダーの反射映像パターンとの関係、さらに地下レーダーの適用限界を把握するため、表-2に示す基本条件を組合わせた埋設物48種類について測定を行なった。鉄製の埋設物は、円形のものには鋼管を用い、三角形、四角形のものには鋼板を折り曲げ加工した。木製は木材をそれぞれの形状に加工した。モルタル製は各断面形状の型枠にモルタルを充てんして作製した。断面寸法は、円形の場合直径を、三角形、四角形の場合は一辺の長さを基準とした。各埋設物とも長さは 90 cm である。

材質	鉄	塩化ビニル	木材	モルタル
形状	○	△	□	
寸法(mm)	25	50	100	200

表-2 埋設物の種類

### 3.2. 実験地盤と測定

図-2に示すように、長さ 1.2 m、奥行 1.0 m、深さ 1.2 m の鋼製土槽に砂あるいは碎石を詰め、埋設物を土槽中央の地表面から 20 cm の位置に設置した。地盤の作製および測定は以下の手順で行なった。

(1) 土槽を満水にし、砂（あるいは碎石）を捲き出し厚さが一様になるように投入しながら詰める。

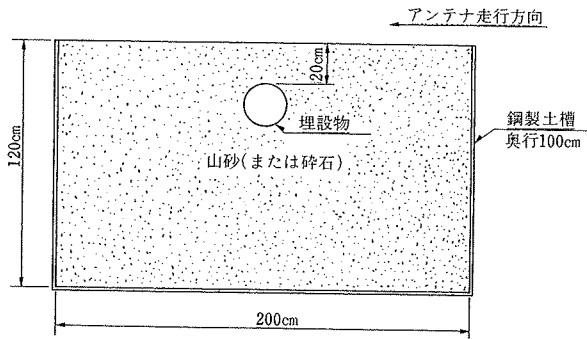


図-2 実験土槽

(2) 1箇の埋設物を所定の位置に設置し、表面をならした後、水位を低下させて比較的均一な密度の地盤とする。

(3) 表面に板を敷き、アンテナを 80 cm/min の一定速度で走向させて測定する。

(4) 水位を地表面まで回復させ、(3)の要領で測定する。

(5) 測定が終了すると約 50 cm の深さまで掘り返し、(1), (2)の要領で別の埋設物を設置し、(3), (4)の要領で測定する。

以上の要領で、砂地盤では48種類の埋設物、碎石地盤では寸法が 10 cm の埋設物について測定した。

実験に用いた砂および碎石の粒径加積曲線を図-3に示す。実験地盤の物理的・電気的性質は表-3に示すとおりである。

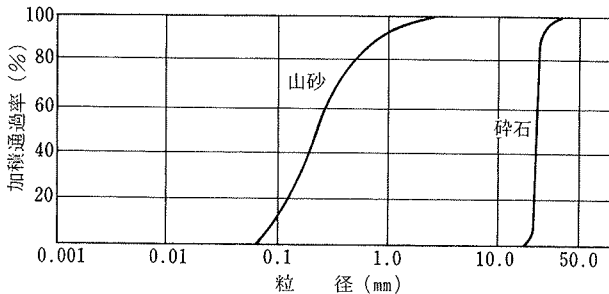


図-3 山砂, 碎石の粒径加積曲線

土質	比重 $G_s$	含水比 $W$ (%)	湿潤密度 $\gamma_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	比誘電率 $\epsilon_r$
山砂	2.38	33.5	1.91	28.6
		11.5	1.59	8.0
碎石	2.67	31.1	1.94	26.8
		1.6	1.50	3.0

表-3 実験地盤の物理的・電気的性質

## 4. 実験結果と考察

### 4.1. 反射映像

#### 4.1.1. 基本パターン 地中レーダーは地表面から

パルス状の電磁波を放射し、地中の物体表面からの反射波を受信アンテナでとらえる。

この信号はグラフィックレコーダー (あるいは CRT) 上に反射映像として表示される。反射映像は図-4に示すように、埋設物の深度と形状・寸法に対応した固有のパターンを有し、物体の表面のみ反射が生ずると仮定して、理論的に求めることができる。

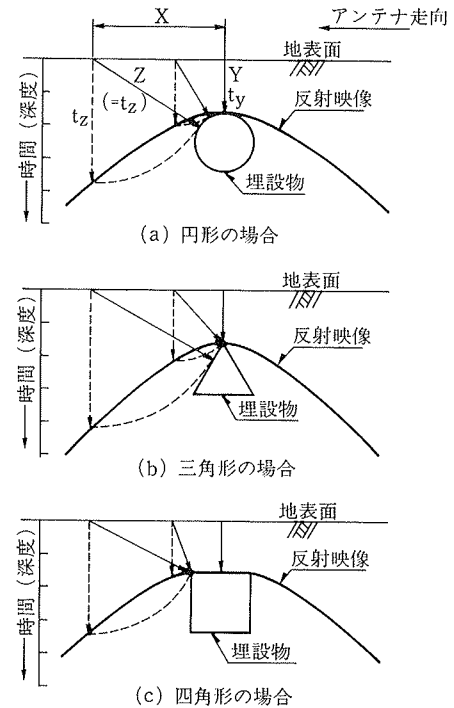


図-4 反射映像基本パターン

例えば図中(a)の円形の場合、地表を走向するアンテナと埋設物の中心位置との離れを  $X, X$  の位置でのアンテナと埋設物の距離を  $Z$  とすると、この位置の反射波はアンテナ直下  $t_z$  に存在するかのように表示される。従って、アンテナの走向に伴ってグラフィック上では反射映像として上に凸の放物線の軌跡が描かれる。放物線の頂点の深度  $t_y$  が埋設物の深さに相当する。

図中(b)の三角形の場合も放物線形状の反射映像となるが、アンテナの走向に伴ってほとんど三角形の頂点における反射波を受信することになり、円形の場合とは若干差異が生ずる。四角形の場合、図中(c)のような反射映像パターンが描かれる。

4.1.2. 測定結果 48種類の埋設物と地盤条件 (2種類の土質, 2種類の地下水位条件) を組合わせ、全体で 120ケースの反射映像を得た。これらのうち、幾つかの測定結果を以下に述べる。

地下水位を  $GL-80$  cm とした砂地盤中に埋設した各形状・寸法の鉄製の物体の反射映像を図-5に示す。反射映像は横軸が距離 (縮尺1/10), 縦軸が深さ (縮尺1/

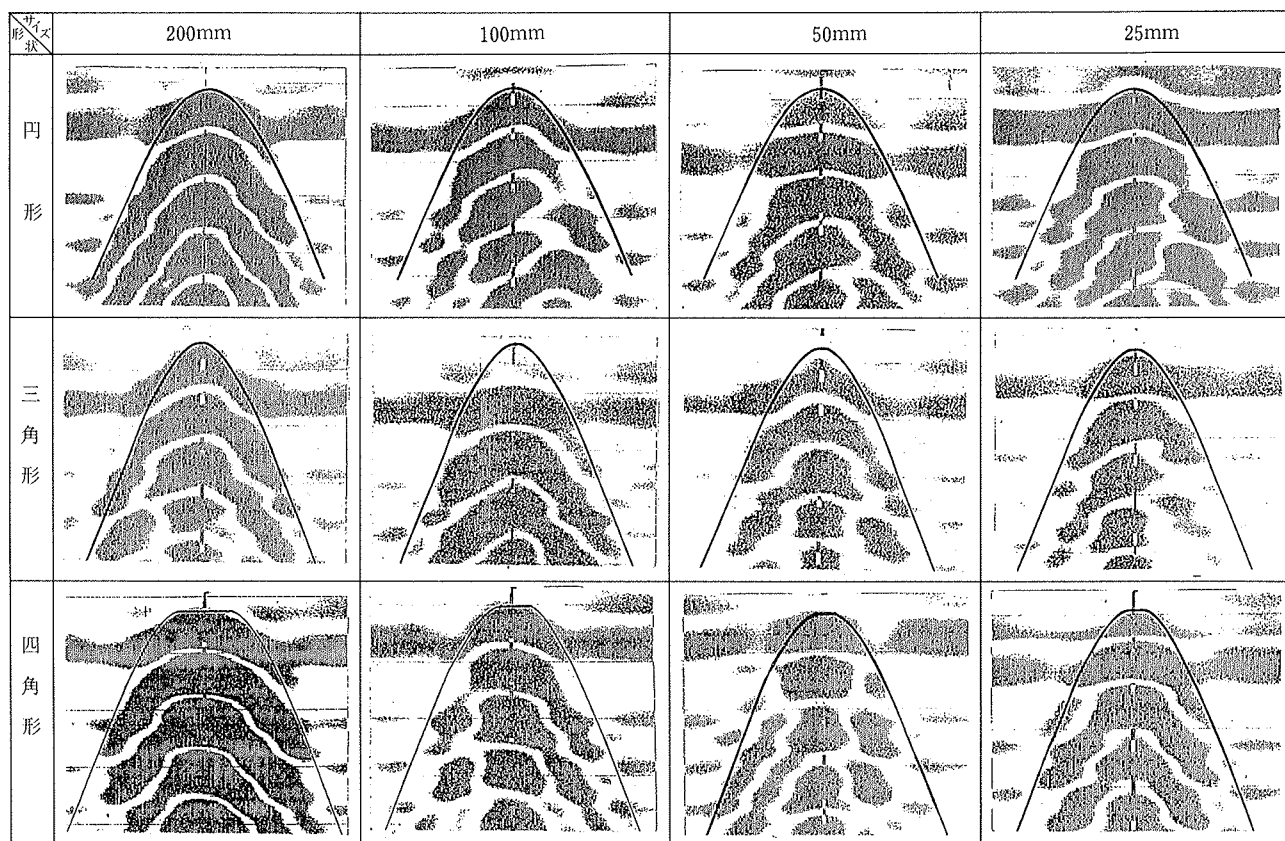


図-5 砂地盤中の鉄製物体の反射映像

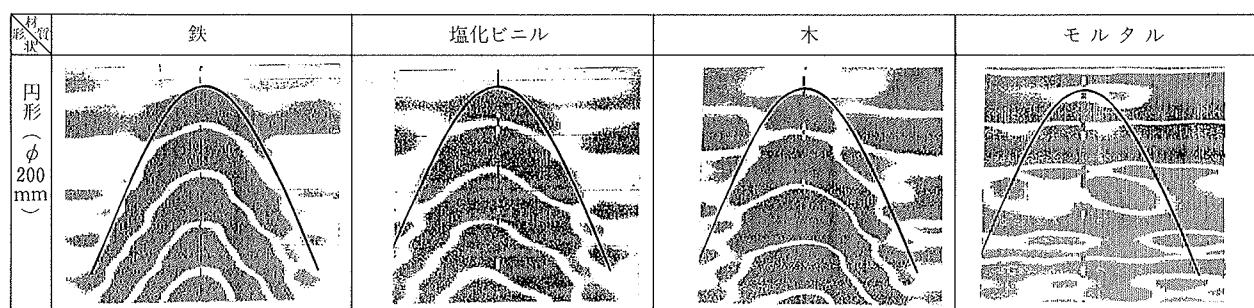


図-6 砂地盤中の各材質の物体の映像

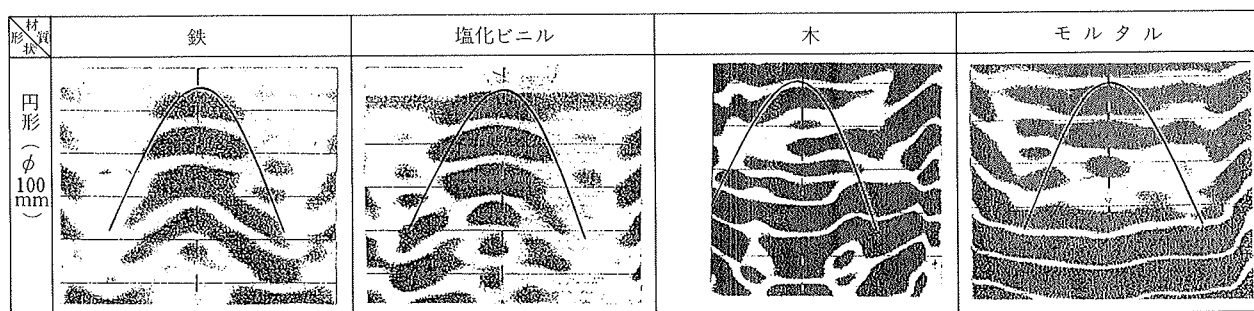


図-7 砕石中の各材質の物体の反射映像

注：図中の線は計算で求めたものである

6.6)で表示されている。図中には前節で述べた方法で作図した計算パターンを示している。

放物線形状の映像が連続して現われ、縞状にみえるのはアンテナおよび埋設物が共振することによって反射波形に振動が生ずるためである。測定の結果、

(1) 測定された埋設物の反射映像は計算で求めた各形状の固有のパターンと比較的よく一致している。

(2) 寸法の大きいものほど放物線形状の反射映像がはっきりしており、小さくなるに従って不明瞭となる傾向がある。さらに、物体の上面が平面形、円形、尖形の順に反射映像が不明瞭になっている。これは、物体のレーダー反射面積に比例して受信電力が変化することに対応する。

(3) 実験に使用した範囲の寸法(25~200 mm)の物体では、反射映像から大きさを区別することは困難である。

図-6に砂地盤中に埋設した直径20 cmの各材質の埋設物の反射映像を示す。鉄製の埋設物の反射映像が最も明瞭で、塩化ビニル、木の順に明瞭さが薄れるものの、計算パターンと比較的一致している。モルタル製の場合反射映像からは物体の存在を検知できない。これは砂とモルタルの電気特性にあまり差がないため、両者の境界面で反射波が生じないためと考えられる。

図-7に碎石中に埋設した直径10 cmの各材質の埋設物の反射映像を示す。砂中の埋設物の反射映像に比べて明瞭さがなくなっている。また、この反射映像からは木製およびモルタル製の埋設物が検知できない。

#### 4.2. 反射強度

図-8は砂地盤中に埋設した直径10 cmの鉄製埋設物の直上における反射波の測定例である。

反射波の埋設物表面の位置に相当する第1波の振幅が反射強度を示す。これより、鉄製の四角形の反射強度を

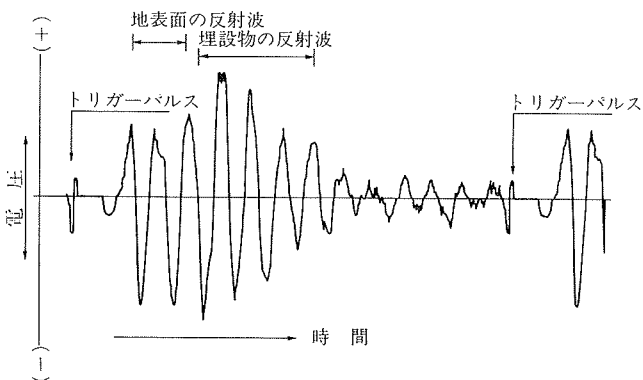


図-8 埋設物の反射波測定例

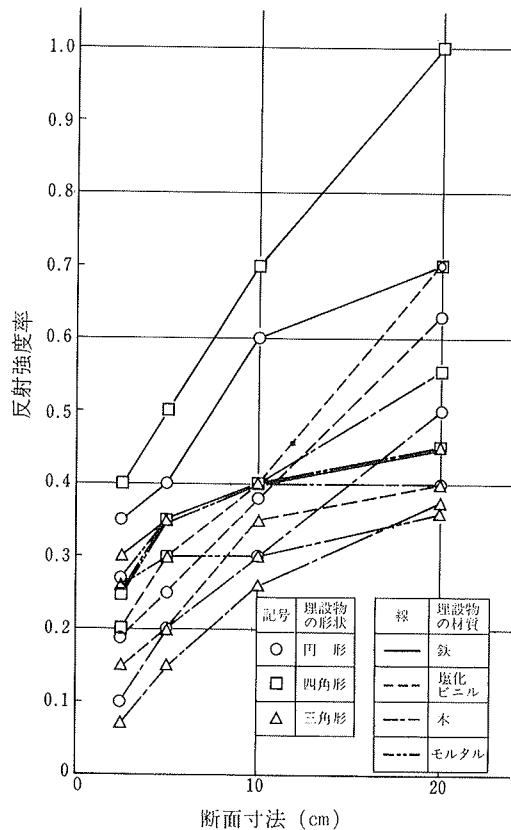


図-9 各物体の電磁波反射強度比率

1として表わした埋設物の反射強度比率を図-9に示す。実験に使用した材料では鉄、塩化ビニル、木の順に反射強度は弱くなる。また反射面積の大きさ、すなわち、四角形、円形、三角形の順に反射強度が弱くなる。

#### 5. まとめ

地下レーダーによる探査実験の結果、つぎのことが判明した。

- (1) 埋設物の反射映像は計算によって求められる固有のパターンに比較的よく一致する。
- (2) 20 cm以下の寸法の埋設物では大きさの区別は困難である。
- (3) モルタル製の埋設物は探査が困難である。
- (4) 碎石中の埋設物の反射映像は砂中の埋設物に比べて不明瞭となる。
- (5) 反射強度は埋設物の電気的性質および電磁波反射面積によって変化する。

今後は現場での測定データを収集するとともに、反射波の画像処理技術について研究を進めていく予定である。