

電波探査技術を利用した浅層地盤調査法

Subsurface investigation by radar system

もり くに みつ とし* あ べ ひろし**
 保 国 光 敏* 阿 部 裕**
 つち ひろ みち お*** い が らし ひろ まさ***
 土 弘 道 夫*** 五 十 嵐 寛 昌***

1. ま え が き

地中浅層部の人工的な埋設物、あるいは空洞などを地表から非破壊的に調査する方法として、電波を利用した新しい調査法が注目されてきている。

この調査法は、地中に埋設物や空洞などが存在する場合には、電波がこれらの電気的特性の異なる境界で反射する性質を利用して、反射波到達の時間差、あるいは位相差を計測しようとする方法である。そのため、境界部における物質の電気的特性に大きな相違がある場合には、簡単に調査することができる。しかし、実際の地中の探査対象物で生じる反射波の測定映像は、非常に複雑であり、これらの正確な位置や形状を判断するための解析技術の確立が急務となっている。

本報文では、理論的に求めた埋設物や空洞の映像パターンと実際に野外実験で測定したパターンについて比較検討し、更に実際の現場に適用した結果、本調査法の有効性が確認できたのでここに報告する。

2. 原理および装置の概要

この調査法は、地中に送信した電波が、電気的特性（誘電率 ϵ_r および導電率 σ など）の異なる物質（埋設物や空洞など）の境界で反射波を生じる性質を利用して、その反射波の映像を解析することにより調査を行うものである。使用する電波の周波数はおよそ 100 MHz～1 GHz であり、波長が短いめ指向性がよい、分解能が高いなどの特長を有し、音波に比較して浅層の地盤調査に適している。

調査可能な最大深度は、電波の送信電力と地中における伝ば損失によって決まる。このうち、送信電力は電波法の規制を受ける注1) のでその大きさは制限される。また、伝ば損失は、地盤の電気的特性や電波の周波数などによって変化するが、主として地盤の導電率によって決まり、導電率が小さいほど伝ば損失が小さい。したがって、導電率が小さいほど調査可能な最大深度は大きくなる。代表的な物質の導電率¹⁾を図-1に示す。導電率の小さい氷などでは数kmの調査例が報告されている²⁾が、一般の地盤では、

導 電 率 σ (S/m)									
10^7	10^6	10^2	10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
自然銀	方鉛鉱	海水	水道水	氷	粘性土	砂岩および石灰岩(湿潤)	砂岩および石灰岩(乾燥)	岩盤	

図-1 代表的物質の導電率 σ (S/m)

数m～十数m程度である。また導電率の大きい海水中での実用性は乏しい。

探査対象物までの深度 Z は、電波の送信から受信までの時間 Δt を測定し、(1)式より求められる。

$$Z = V \times \Delta t / 2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

V : 地盤中における電波の伝ば速度

地盤中における電波の伝ば速度は、(2)式で表されるが、通常の土が非磁性体と考えられることや、電波の周波数が高いことから近似的に誘電率の関数として(3)式で求められる³⁾。

$$V = \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r \mu}} \times \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_r} \right)^2} + 1 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\approx c_0 / \sqrt{\epsilon_r} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ϵ : 地盤の絶対誘電率注2) ($\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$)

ϵ_r : 地盤の比誘電率 (通常、誘電率と称する)

ϵ_0 : 真空の絶対誘電率 ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)

μ : 地盤の透磁率注3)

σ : 地盤の導電率注4)

ω : 電波の角周波数 ($\omega = 2\pi f$)

c_0 : 真空中における電波の伝ば速度

($c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

次に、誘電率は、土の種類や含水状態によって異なることが知られている。筆者らは、リアクタンス法の一つであ

注 1) 電波法第28条に基づく郵政省令設備規則第5条～第7条に定められている。

注 2) 電束密度 D と電場 E との関係 $D = \epsilon E$ を表す ϵ を誘電率という。真空の誘電率 ϵ_0 との比を比誘電率というが、単に誘電率といえらばつうはこの値をさす。

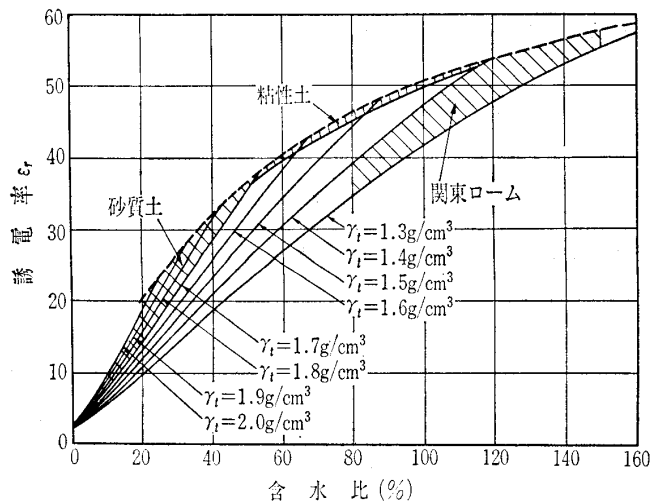
注 3) 磁束密度 B と磁場 H との関係 $B = \mu H$ を表す μ を透磁率という。注 4) 定常電流の密度 i と電場 E との関係 $i = \sigma E$ を表す σ を電気伝導率という。

詳細については、理化学辞典(岩波書店)などを参照されたい。

*鹿島建設株式会社 技術研究所 土質基礎部 部長

**鹿島建設株式会社 技術研究所 土質基礎部 主任研究員

***鹿島建設株式会社 技術研究所 研究員

図-2 含水比 w と単位体積重量 γ_t から誘電率を求める図

る静電容量方式により種々の土の誘電率を測定し、土の物理的性質との関係を検討した^{(4),(5)}。その結果、土の誘電率は、土を構成している成分（土粒子、水、空気）の誘電率と容積率によって表される(4)式（Beer（ビア）の式⁽⁶⁾）をもとに導いている。）を用いて、土の種類にかかわらず近似的に計算できることを明らかにした。

$$\sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{\epsilon_s} \cdot \phi_s + \sqrt{\epsilon_w} \cdot \phi_w + \sqrt{\epsilon_a} \cdot \phi_a \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 ϵ_s , ϵ_w , ϵ_a : 土粒子、水、空気の誘電率

$$(\epsilon_s \doteq 4, \epsilon_w \doteq 81, \epsilon_a \doteq 1)$$

ϕ_s , ϕ_w , ϕ_a : 土粒子、水、空気の容積率

（比重、単位体積重量、含水比から求まる。）

また、これらの物性値は土の種類によりおおむねその値の範囲が限定されるので、それを考慮して、土質ごとに誘電率の範囲を求めたのが図-2である。

この図を参考にして、(1), (3)式を用いれば、探査対象物までの深度が決定される。

調査精度は、測定条件、地盤条件など種々の要因により影響を受ける。実績によれば、地中数mの深さの埋設物に対して、鉛直精度は概略 ± 30 cm、水平精度は概略 ± 10 cm程度である。

図-3 に今回使用した探査装置の構成、表-1 に仕様、写真-1, 2に外観を示す。

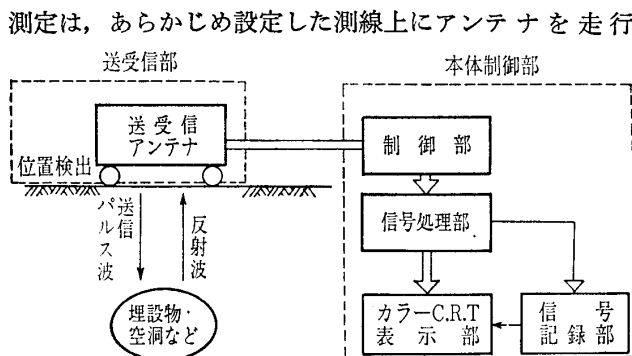


図-3 装置の構成

表-1 装置の仕様

項 目	仕 様
アンテナ	偏型ダイポールアンテナ 送信波: 6 ns モノサイクルパルス 尖頭電圧: 約 150 Vp-p 周波数帯域: 50~350 MHz 繰返し周波数: 50 kHz W 1070×H 250×L 940 mm, 50 kg
本 体	受信利得: 55 dB $\pm$ 3 dB 表 示: 11インチカラーブラウン管, 8色 画素密度: 256ビット $\times$ 256ビット W 520×H 340×L 500 mm, 40 kg
ケーブル	同軸ケーブル 1.5D 2V, 7本で構成 長 さ: 30m
使用電源	AC 100 V, 50/60 Hz

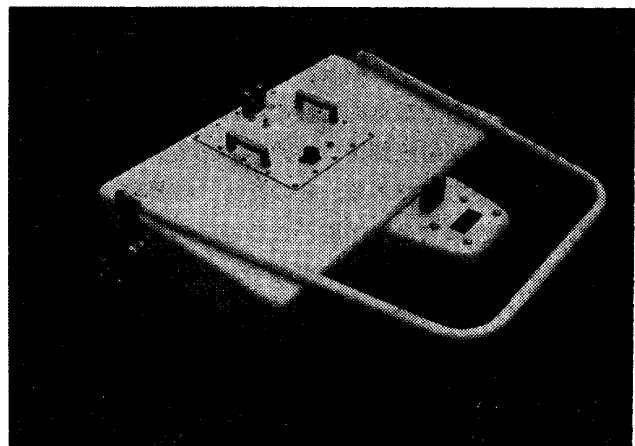


写真-1 送受信部（アンテナ）

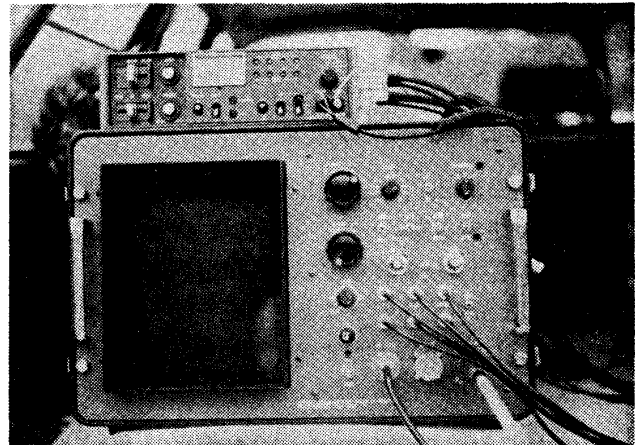


写真-2 本体制御部

（約 10 m/min の速度）させることにより行う。測定結果は、走行と同時に地中断面像としてカラーブラウン管（CRT）に表示されるので、必要に応じて繰り返し詳細に測定を行うことができる。また、測定結果は、同時に信号記録部に記録することができる。

3. 基本パターンの推定と現場適用例

地中に埋設物、空洞などが存在する場合には、電波はその境界で一部は反射されるが、残りの電波は透過して更に地中に伝播する。このとき、装置の CRT に表示される映

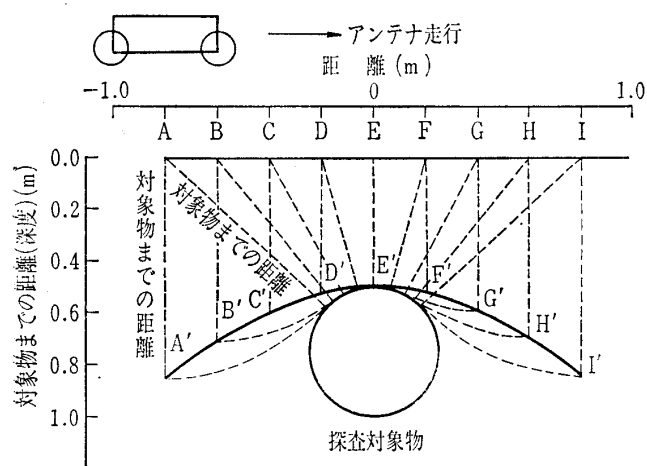


図-4 映像パターンの計算例

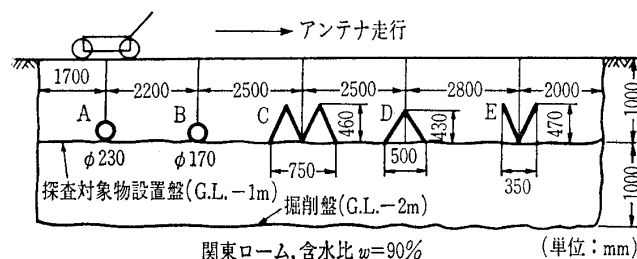


図-5 野外確認実験概要図

像は、探査対象物の形状や物質に依存して特有の映像パターン（以下パターンと称する）を示す。このパターンをより多くの形状、物質について把握しておくことが、地盤調査を行う上で重要なポイントである。

3.1 地中埋設物調査への適用について⁷⁾

探査対象物の断面形状が異なれば、CRTに表示される映像は、その断面形状に依存したパターンとなる。そのパターンは、以下のようにして、理論的に求めることができる。ここでは、一例として丸型の物体に対して、反射は物体の表面でのみ生ずると仮定して、そのパターンを求めた。

アンテナから送信された電波は地盤中を鉛直下方にのみ伝ばするものではないので、図-4に示すように、アンテナがA地点に位置する場合でも、送信電波は物体まで伝ばし反射波を生じる。この反射波は再びアンテナで受信され、CRTには見かけ上A'の位置（反射波の生じた物体までの距離と等しい深度の位置）に物体が存在しているように表示される。同様にして、アンテナをA, B, …… Iの順に走行させると、CRTにはA', B', …… I'のように表示される。したがって、丸型の物体は、CTRには放物線状のパターンとして表示されることになる。

このような考えで、任意の断面形状の物体に対してパターンを理論的に求めることができるので、あらかじめ種々の断面形状の物体に対して映像パターンを計算により求めておき、この計算パターンと実際の映像パターンとの関係を

把握するため野外確認実験を行った。実験場所は関東ローム地盤であり、図-5に示すように土層を均一にするために、G.L.-2mまで掘削した後G.L.-1mまで埋め戻し、その上に電波の反射の強い鉄製の種々の断面形状の物体を埋設し、測定を行った。

測定結果を図-6に示す。測定されたパターンは、計算により求めたパターン（図中に併記）とよく一致しており、物体の断面形状に依存した特有のパターンは理論的に推定できることが分かった。

以上の結果から、これまで推定できなかった埋設物の形状も、ある程度推定できる目安を得ることができた。

3.2 地中空洞調査への適用について⁸⁾

物体の断面形状に依存したパターンについて3.1で述べたが、空気や水などのように電気的特性の著しく異なる物質が地盤中に存在する場合にも、特有のパターンとなる。すなわち、空気や水は、電波の伝ば速度が土などと異なるため、空気や水を透過した電波は、土中を伝ばする電波と送信から受信までの時間に差を生じ、映像が収縮した、または伸びた形で映し出される。

(1) 空洞の推定パターンと確認実験

電波の伝ば速度は、2.で述べたように誘電率に依存するが、空気の誘電率は土に比べて小さいため、地盤中に比べて空气中では伝ば速度が大きい。したがって、地盤中に空洞が存在する場合には、CRTに表示される映像は図-7に示すように、空洞のある部分では底部が引き上げられるとともに、直下の土層の層境では、その周囲に比べ空洞の影響を受けて土層がちぢみ上がるパターンになることが推定される。

実際に、関東ローム中に図-8に示すような空洞を想定した木箱を埋設した実験結果では、図-9に示すように、空洞が存在する部分では、理論的に推定したように、空洞底部の反射により生じた映像が実際の底部位置より引き上げられて、上部の反射による映像と重なって生じている。

また、木箱内を水で満たした場合は、水は土などに比べて誘電率が大きく、電波の伝ば速度は地盤中に比べて小さいため、水のある部分はその周囲と比べて、図-10に示すように、伸びたパターンとなる。

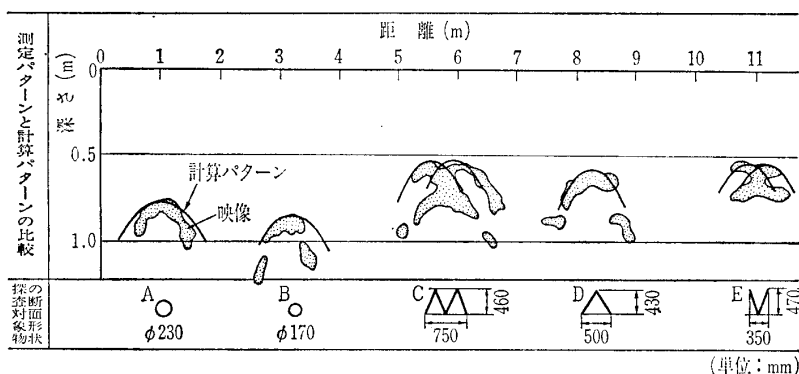


図-6 野外確認実験による測定結果および計算により求めたパターン

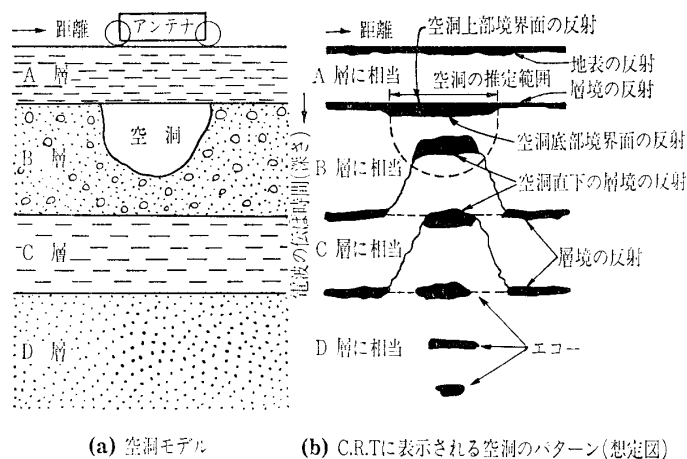


図-7 空洞が存在する場合の想定パターン

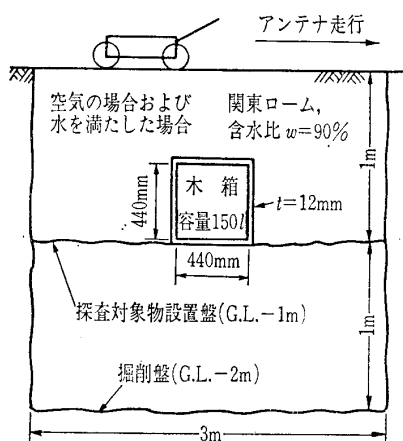


図-8 野外確認実験概要図

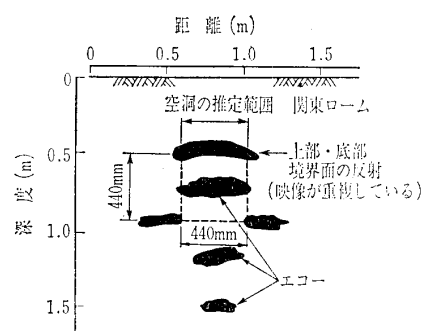


図-9 空洞の測定例

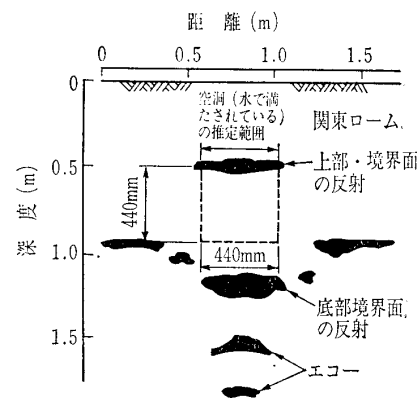


図-10 空洞(水で満たされている)の測定例

このように、これらの空洞特有のパターンを知れば、空洞の有無および内部の状況を判定することができる。

(2) 現場適用例

工場を建設するにあたり、埋設管路の正確な平面位置を知る必要があり、本装置を用いて調査を実施した。図-11に示すような5本の測線を設定し、測定を行った。

この結果、各測線上で空洞特有のパターンが得られ、管路の平面位置および管内の状況を推定することができた。測定結果の一例を図-12に示す。

この調査結果をもとに開削工事を行ったところ、管路はコンクリートによって防護されたヒューム管となっており、本法による推定位置とよく一致していた。また、ヒューム管内は空洞となっており、この結果も本法によって推定した結果とよく一致した。

4. あとがき

最近、土木分野における先端技術の利用法の一つとして注目されている、電波を利用した浅層地盤調査法について、野外実験などをもとにその適用性の検討を行った。その結果、埋設物および空洞などの調査に対して有効な方法であることが判明した。

この方法は、非破壊法であるため、短時間に広い範囲の

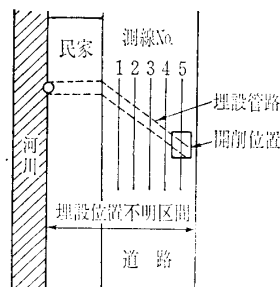


図-11 現場調査平面図

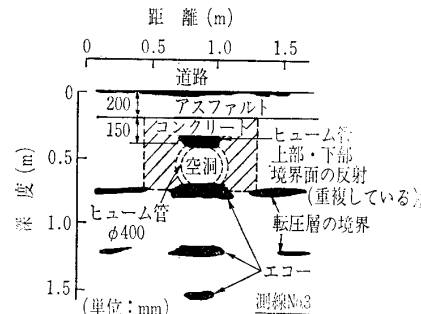


図-12 現場調査結果

ment, AIEE, Communication and Electronics, Vol. 79, No. 51, 1960.

- 鈴木 務：電波による地中・水中の探査，計測と制御，Vol. 20, No. 8, pp. 24~33, 1981.
- 山本毅史・阿部 裕・土弘道夫・五十嵐寛昌：電波探査技術を利用した浅層地盤調査法について(その2)，鹿島建設技術研究所年報，No. 33, 1985.
- 阿部 裕・土弘道夫・五十嵐寛昌：電波探査技術を利用した浅層地盤調査法について(その2)，第20回土質工学研究発表会，1985.
- 北原良哉：岩石の電気的性質について(その2)，探鉱と保安，Vol. 19, No. 5, pp. 26~48, 1973.
- 山本毅史・阿部 裕・土弘道夫・五十嵐寛昌：電波探査技術を利用した浅層地盤調査法について(その1)，鹿島建設技術研究所年報，No. 32, pp. 155~158, 1984.
- 阿部 裕・土弘道夫・五十嵐寛昌：電波探査技術を利用した地盤調査法について(その1)，第19回土質工学研究発表会，pp. 101~102, 1984.

(原稿受理 1985.3.29)