

地盤調査に対する地下レーダーの適用性について

原 徹夫・坂山利彦

THE APPLICABILITY OF GROUND PROBING RADAR TO SITE INVESTIGATIONS

Tetsuo HARA and Toshihiko SAKAYAMA

Abstract

The concept of using the reflections of electromagnetic waves in exploration is relatively old (Melton, 1937; Donaldson, 1953). It was Cook (1960) whose exhaustive study of pulse radar provided the theoretical basis for the idea. Since then, a variety of pulse radar systems using a broad range of frequencies have been developed. Since 1970, there have been many reports of their applications on snow, ice, frozen soil, salt mines, etc.

Stimulated by successes realized by these systems, the late 1970's saw attempts to apply ground probing radar to soil and rock ground (Morley, 1974; Annan and Davis, 1977; Benson, 1979). Although a great deal of research on these applications has not yet been carried out, available research results shows that electromagnetic waves propagated through the ground are subject to a high degree of attenuation due to loss of electromagnetic energy and that transmission energy is extremely weak. Consequently, exploration using ground probing radar cannot escape the fact that the system can only function to a limited depth. However, from the standpoint of resolution of subsurface structure, ground probing radar is undeniably superior to other systems.

Thus, for investigations dealing with very shallow depths, ground probing radar may be considered an especially effective method. The authors investigated the applicability of ground probing radar and the nature of reflection boundaries shown by it.

Chapter 2 covers an explanation of the radar apparatus and the measurement procedure.

Chapter 3 discusses the physical properties of the reflection layers shown by ground probing radar.

Magnetic permeability, dielectric constant, and conductivity are represented μ , ϵ and σ respectively. If a plane wave with angular frequency ω from a medium with the properties μ_1 , ϵ_1 and σ_1 strikes a medium with the properties μ_2 , ϵ_2 and σ_2 perpendicularly, the reflection coefficient R is expressed by Formula (4). Formula (4) may be considered in terms of different cases according to the value of loss tangent $\sigma/\omega\epsilon$:

Case 1 : When $\sigma_1/\omega\epsilon_1 \ll 1$, $\sigma_2/\omega\epsilon_2 \ll 1$

In this case, both the upper and lower layers are close to being non-conductors. Reflection coefficient may be approximated with Formula (8). Reflection depends mainly on changes in dielectric constant.

Case 2 : When $\sigma_1/\omega\epsilon_1 \ll 1$, $\sigma_2/\omega\epsilon_2 \gg 1$

In this case, the upper layer is resistive and the lower layer is conductive. Reflection depends on both dielectric constant and conductivity.

Case 3 : When $\sigma_1/\omega\epsilon_1 \gg 1$, $\sigma_2/\omega\epsilon_2 \gg 1$

In this case, both the upper and lower layer are conductive. Reflection coefficient may be approximated with Formula (9). Reflection depends mainly on changes in conductivity.

Case 4 : $\sigma_1/\omega\epsilon_1 \gg 1$, $\sigma_2/\omega\epsilon_2 \ll 1$

In this case, the upper layer is conductive and the lower layer is resistive. Reflection depends on both dielectric constant and conductivity.

Of the above four cases, in those cases when the upper layer is conductive (Cases 3 and 4) damping factor in the upper layer is large, and it is practically impossible to detect the reflected waves. Consequently, Cases 1 and 2 should be considered.

Differing dielectric constant boundaries corresponding to Case 1 may be considered to be due to differences in moisture content values, the presence of cavities, etc. For Case 2, the presence of salt water within the layer at some depth may be considered. Sections 3-1 and 3-2 give examples of investigations in cases like these.

Chapter 4 covers the use of ground probing radar with electrical exploration. In the previous chapter it was mentioned that under the ground conditions $\sigma_1/\omega\epsilon_1 \ll 1$, $\sigma_2/\omega\epsilon_2 \ll 1$, the reflections of electromagnetic waves are mainly determined by dielectric constant. However, even under ground conditions like these, reflection surfaces shown by radar often coincide well with resistivity boundaries determined by electrical sounding by the resistivity method (Section 4-1). This may be attributed to the fact that dielectric constant and resistivity values of soil frequently change according to differences in soil properties (porosity, moisture content, texture, etc.) in each layer.

Considering that electromagnetic wave velocity and resistivity both reflect differences in soil properties, it is possible that by using the two methods together, more accurate estimates of soil properties could be made.

Here, unsaturated soil is regarded as a mixture of soil particles, water and air, whose specific dielectric constant is defined by Formula (10) and conductivity by Formula (15). Transforming both formulas and combining them gives Formula (18). This formula shows that, if degree of saturation of the soil is known, resistivity and electromagnetic wave velocity values of the soil can be used to determine resistivity of pore water. I_f of Formula (19) is defined from Formula (18). This value is an index that can be determined from resistivity and electromagnetic wave velocity values of the soil. It coincides with the resistivity of pore water when saturation of the soil is 1.

Figure 15 shows an example of the use of ground probing radar and electrical exploration together. Figure 16 shows the results of analysis of the data obtained. Table 2 compares electromagnetic wave velocity, resistivity, I_f value and soil test results.

Chapter 5 discusses the applications of ground probing radar, as well as the relationship between electrical coefficients of the ground and exploration depth.

Electromagnetic waves propagated through the ground are mainly reflected by boundaries of change in dielectric constant, that is, changes in moisture content. Boundaries representing changes in moisture content are formed by differences in soil properties, such as sandy and clayey soil layers. Besides this, other conceivable boundary forming phenomena are water table and abrupt changes in degree of compaction of fill soil. These kinds of boundaries may be detected by radar. Electromagnetic reflection surfaces and resistivity boundaries often coincide. The combined use of ground probing radar and electrical prospecting is thus an effective method of determining soil properties of ground layers. Furthermore, the high resolving power of ground probing radar shows authority in detecting underground cavities and other anomalies in the ground.

In this way, ground probing radar has a great number of applications to soil ground. However, the greatest obstacle to ground probing radar is the attenuation of electromagnetic waves. This attenuation is known to be dependent mainly on ground resistivity. Consequently, potential exploration depth may be said to be mainly dependent on ground resistivity.

Figure 17, where $f=100\text{MHz}$, $v=10\text{ cm/ns}$ and reflection coefficient R is a parameter, the relationship between resistivity ρ and potential exploration depth D . From these results, in ground of about $1000\Omega\text{m}$, potential depth is $10\sim 20\text{m}$.

1 まえがき

電磁波による反射法探査の着想は比較的古くからある (MELTON, 1937; DONALDSON, 1953) が、本格的なパルスレーダーの研究は、COOK (1960) が行った理論的研究によって始まったといつてよい。COOK は、微細な地下構造に対する検出能力を高め、かつ、地盤の導電性に伴う吸収、または散乱によるエネルギーの損失を防ぐ最適の方法が、広帯域のスペクトルを有するパルス波を利用することであることを示し、その場合の送信および受信エネルギーの大きさを見積った。また、氷の厚さの測定を目的とするアイスレーダーのことを初めとし、地下水面、石灰岩中の空洞、岩盤内の破砕帯などの探査の可能についても言及している。

それ以降行われてきた地下レーダーの研究では、パルスの発生方法やアンテナの種類などについては、エレクトロニクス技術の発展につれて進歩を遂げているが、広帯域のパルス波を利用する点は、基本的には踏襲されている。

地下レーダーによる地下構造の探査は、極地の雪氷を対象として、1960年代の初めに開始され (COOK, 1960; EVANS, 1963), 1970年代に入ると、以下のような様々な方面で地下レーダーの適用が試みられるに至った。すなわち、南極における 800~2800m におよぶ氷層の厚さ (HARRISON, 1970), 氷河や海氷の厚さ (CAMPBELL, 1974), 月の地下構造 (PORCELLO, 1974), 岩塩鉱山 (UNTERBERGER, 1974), 石炭鉱山 (COOK, 1975) などの調査結果が報告されている。

これらの成功に促されて、1970年代後半においては、土や岩の一般的な地盤に対する地下レーダーの適用が試みられてきた (MOREY, 1974; ANNAN and DAVIS, 1977; BENSON, 1979)。その事例はそれほど多くは無いが、これまでの研究成果によれば、地盤内を伝播する電磁波は電磁氣的損失による減衰が大きく、その透過力は極めて弱いものと考えられる。したがって、地下レーダーによる探査では、探査深度に対する限界という問題が常に付きまとう。しかしながら、地下構造に対する分解能という点では、他の探査手法には見られない優れた

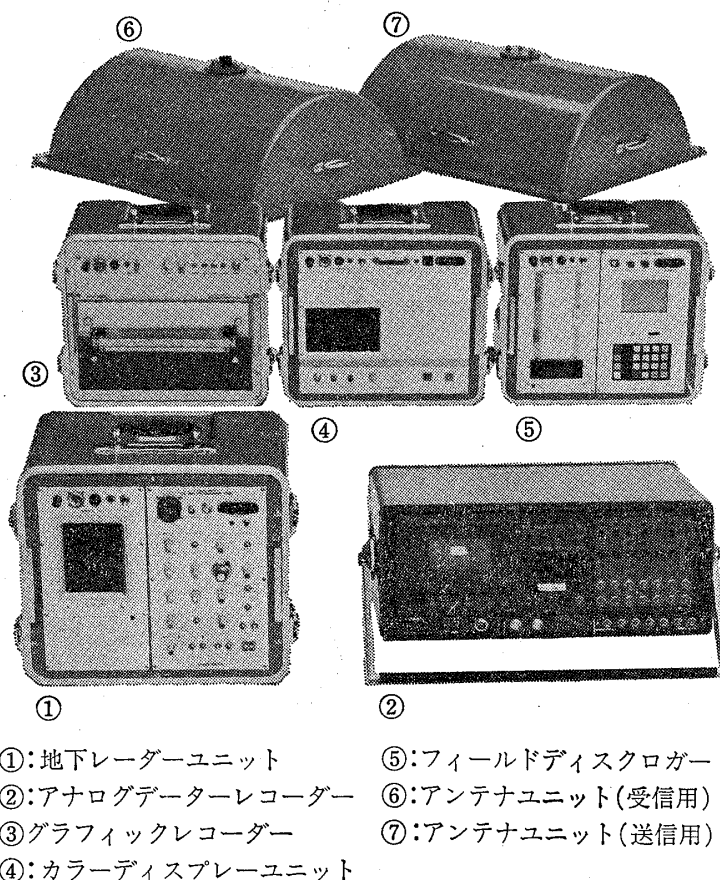


図-1 地下レーダー装置 (YLR 2)

Fig. 1 Georadar YLR 2

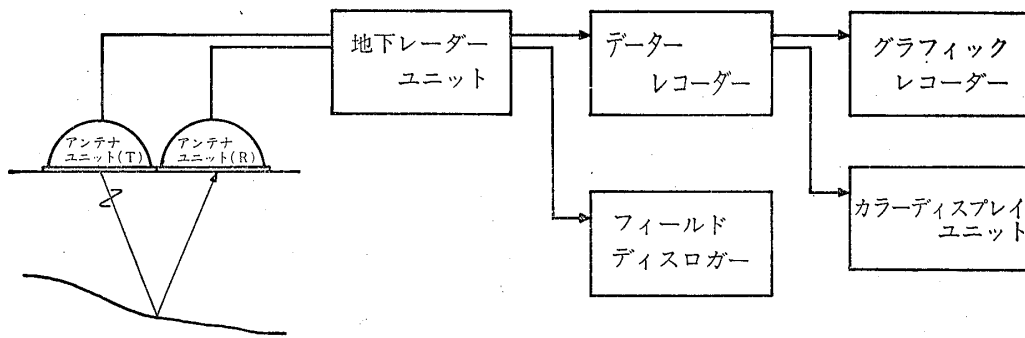


図-2 地下レーダーブロックダイアグラム
Fig. 2 Block diagram of Georadar

能力を有していることは見過ごすことのできない事実である。

このような観点からは、極めて浅い地下構造を問題とするような調査の場合に、地下レーダーは、とくに有効な探査法となるものと考えられる。そこで、種々の実験を行って、地下レーダーによって捉えられる反射面の性質や適用上の問題、さらにその限界などについて検討を行った。

2 地下レーダー装置の概要と測定方法

地下レーダー装置の全様を図-1に、また、そのブロックダイアグラムを図-2に示す。この装置は大別すると、送信アンテナ、受信アンテナ、地下レーダーユニットおよび各種の外部記録装置から構成されており、アンテナは送信と受信を分離した2アンテナ方式となっている。

送信アンテナから放射される電磁波パルスは、立ち上がり時間数は 10^{-9} secのオーダーで、100MHz~数100MHzの周波数帯域を有する広域バンドパルスである。送信アンテナから放射された電磁波パルスは、地下の反射面で反射し、受信アンテナによって受信される。受信信号は、サンプリングブリッジ回路によって可聴周波数帯域の電気信号に変換され、地下レーダーユニットに入力される。地下レーダーユニットにおいては、反射位相をより識別し易いものにするために、入力信号に対しては、TGF (タイムゲインファンクション)、BPF (バンドパスフィルター)、AGC (オートゲインコントロール) などの信号処理が行われる。そして、内蔵プリンターに記録されるとともに、グラフィックレコーダーあるいはカラーディスプレイユニットなどの出力装置に可視記録として表示される。

2アンテナ方式の地下レーダー装置による通常の地下探査において使われる一般的な測定方法は、プロファイ

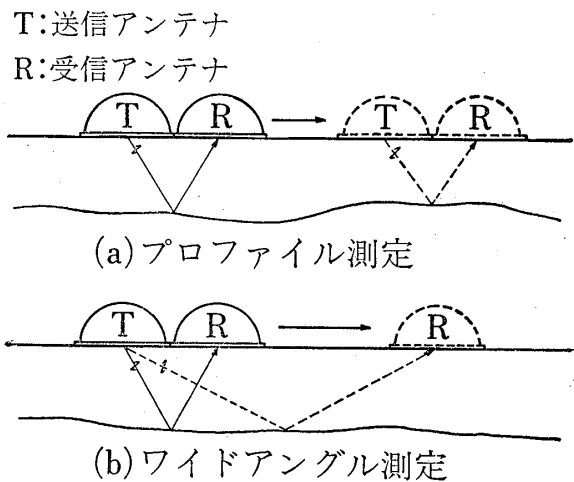


図-3 地下レーダーの測定方法
Fig. 3 Measuring method (a) Profile measurement
(b) Wide angle measurement

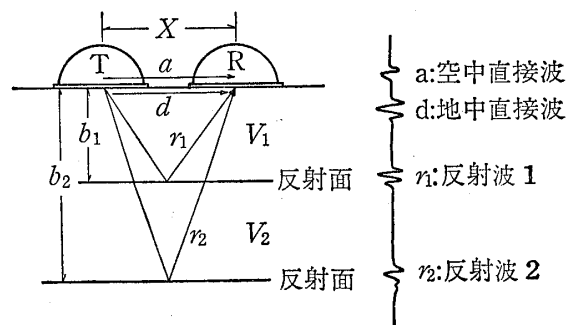


図-4 電磁波の波路と地下レーダーによる受信波形
Fig. 4 Paths of electromagnetic waves and corresponding waveforms

ル測定法とワイドアングル測定法である(図-3)。プロファイル測定法は、送信アンテナと受信アンテナの間隔を一定に保ったまま測線を移動して測定を行う方法で、測線下の反射面の形状が、ほぼそのままの形で、時間断面としてグラフィック記録上に得られ、反射面の起

伏の変化や、その構造を直接的に把握することができ。一方、ワイドアングル測定は、送信アンテナを一点に固定し、受信アンテナを移動して測定を行う方法で、観測された地盤中を伝播する電磁波の走時から、地盤内の電磁波伝播速度の分布が求められる。

このような測定で得られる受信波形には、主として、空中直接波、地中直接波、地中反射波の位相(図-4)が見られ、それぞれの走時はつぎのように表される。

$$T(a) = \frac{X}{V_a} \quad (1)$$

$$T(g) = \frac{X}{V} \quad (2)$$

$$T(r) = \frac{\sqrt{4D^2 + X^2}}{V} \quad \left(T(r)^2 = \frac{4D^2}{V^2} + \frac{X^2}{V^2} \right) \quad (3)$$

- ここに、 $T(a)$: 空中直接波の走時
 $T(g)$: 地中直接波の走時
 $T(r)$: 地中反射波の走時
 X : 送信アンテナと受信アンテナの距離
 D : 反射面の深さ
 V_a : 空中における電磁波伝播速度
 V : 地中における電磁波伝播速度

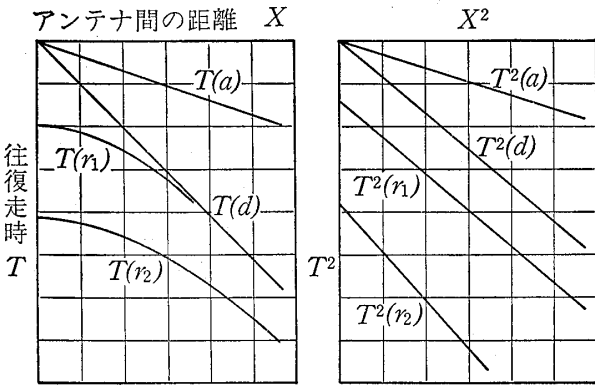


図-5 伝播波の走時曲線

Fig. 5 Travel time graph of various propagated waves

図-5にそれぞれの伝播波の走時曲線を示す。ワイドアングル測定から得られる反射波に対する走時は、(3)式からも明らかなように、 T^2-X^2 平面上で直線となり、その勾配および零点($X=0$)走時から、地中伝播速度 V および反射面の深さ D がそれぞれ求められる。

3 地下レーダーによる地下構造探査

地盤の透磁率、誘電率および導電率をそれぞれ μ , ϵ

および σ で表すと、角周波数 ω の平面波が、 $(\mu_1, \epsilon_1, \sigma_1)$ の媒質から $(\mu_2, \epsilon_2, \sigma_2)$ の媒質に垂直に入射する場合の反射係数 R は、つぎの式で与えられる。(付録1参照)

$$|R_{\perp}| = \frac{\sqrt{(a^2 - b^2)^2 + (ab \sin \phi)^2}}{a^2 + b^2 + 2ab \cos \phi} \quad (4)$$

$$\text{ここに、} a = \mu_2 / \mu_1 \quad (5)$$

$$b = \sqrt{\frac{\mu_2 \epsilon_2 \sqrt{1 + (\sigma_2 / \omega \epsilon_2)^2}}{\mu_1 \epsilon_1 \sqrt{1 + (\sigma_1 / \omega \epsilon_1)^2}}} \quad (6)$$

$$\phi = \tan^{-1}(-\sigma_2 / \omega \epsilon_2) - \tan^{-1}(-\sigma_1 / \omega \epsilon_1) \quad (7)$$

(4)式によって表される反射係数 R の値は、誘電正接 ($\sigma / \omega \epsilon$) の値によって、つぎの4つの場合に分けて考えることができる。

- 1) $\sigma_1 / \omega \epsilon_1 \ll 1, \sigma_2 / \omega \epsilon_2 \ll 1$ の場合

この場合は、第1層および第2層の媒質が、ともに絶縁体に近い場合に相当し、 $b \approx \sqrt{\epsilon_2 / \epsilon_1}$ となり、したがって、(4)式は

$$|R_{\perp}| = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (8)$$

となり、反射は、主として第1層と第2層の誘電率の差異に依存することになる。

- 2) $\sigma_1 / \omega \epsilon_1 \ll 1, \sigma_2 / \omega \epsilon_2 \gg 1$ の場合

この場合は、第1層の媒質が絶縁体に近く、第2層の媒質が良導体に近い場合に相当し、反射は両層の誘電率および導電率の双方に依存することになる。

- 3) $\sigma_1 / \omega \epsilon_1 \gg 1, \sigma_2 / \omega \epsilon_2 \gg 1$ の場合

この場合は、第1層および第2層の媒質が、ともに良導体に近い場合に相当し、 $b \approx \sqrt{\sigma_2 / \sigma_1}$ となり、したがって、(4)式は、

$$|R_{\perp}| = \frac{\sqrt{\sigma_1} - \sqrt{\sigma_2}}{\sqrt{\sigma_1} + \sqrt{\sigma_2}} \quad (9)$$

となり、反射は、主として、第1層と第2層の導電率の差異に依存することになる。

- 4) $\sigma_1 / \omega \epsilon_1 \gg 1, \sigma_2 / \omega \epsilon_2 \ll 1$ の場合

この場合は、第1層の媒質が良導体に近く、第2層の媒質が絶縁体に近い場合に相当し、反射は両層の誘電率および導電率の双方に依存することになる。

上記の4つの場合のうち、第1層の媒質が良導体に近い場合 ($\sigma_1 / \omega \epsilon_1 \gg 1$) は、第1層内での減衰定数が大となり、3)および4)の場合は、反射波を捕捉することが事実上は不可能である。したがって、探査の対象となるの

は、第1層の媒質が絶縁体に近い場合 ($\sigma_1/\omega\epsilon_1 \ll 1$) であるので、1)および2)の場合について考察する。

1)の場合 ($\sigma_1/\omega\epsilon_1 \ll 1, \sigma_2/\omega\epsilon_2 \ll 1$) に相当する誘電率の差異による境界の例としては、含水率の異なるような

層境界や空洞の存在が考えられ、2)の場合 ($\sigma_1/\omega\epsilon_1 \ll 1, \sigma_2/\omega\epsilon_2 \gg 1$) に相当する例としては、地層の下部に塩水が浸透しているような場合が考えられる。

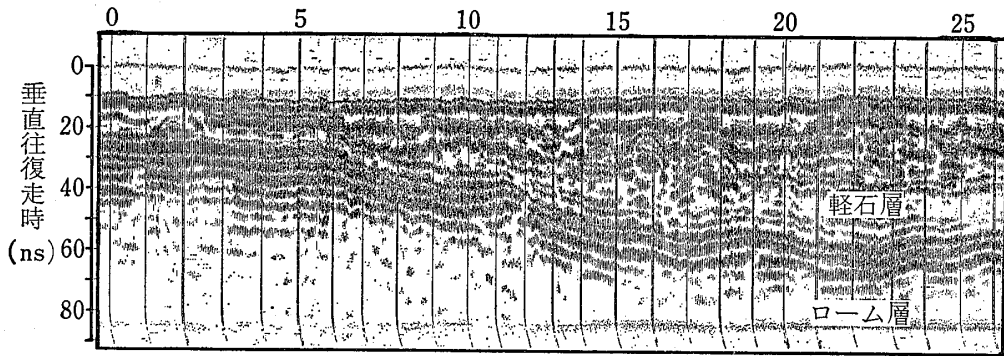


図-6 プロファイル測定記録(1)
Fig. 6 Record of profile measurement (1)

3-1 地層境界における電磁波の反射

一般に、地層を構成する土粒子自身の誘電率(比誘電率3~5)に比べて、水の誘電率(比誘電率80)は非常に大きいために、含水率の異なる地層が相接しているような場合には、その地層境界が電磁波の反射面として捉えられることになる。

火山の噴出による軽石層が厚く堆積している地域において、プロファイル測定法によって得られた測定記録を図-6に示す。このプロファイル記録によれば、反射時間が30~55nano sec程度で、ゆるやかな起伏を示す反射面が明瞭に認められる。また、図-7に示すように、ワイドアングル測定の結果によれば、上記の反射面より上部の層の平均の電磁波伝播速度は、9.0cm/nano secである。したがって、この伝播速度から求められる反射時間が30~55nano secに対応する反射面までの深さは、およそ1.3~2.5mである。

一方、この測線上で実施した幅7m、長さ12m、深さ3mのトレンチによる地質観察結果によれば、当地の地質は、軽石層およびローム層から成り、これら両層の境界付近にはかなりの湧水が認められた。この観察結果と地下レーダーによる測定結果とを対比すると、地下レーダーで得られた反射面深度は、観察による地層境界深度と±5cmの範囲で合致しており、地下レーダーによって精度よく測定することができることを確認した。

このように、軽石層とローム層の境界を明確にすることができた理由としては、つぎのことがあげられる。

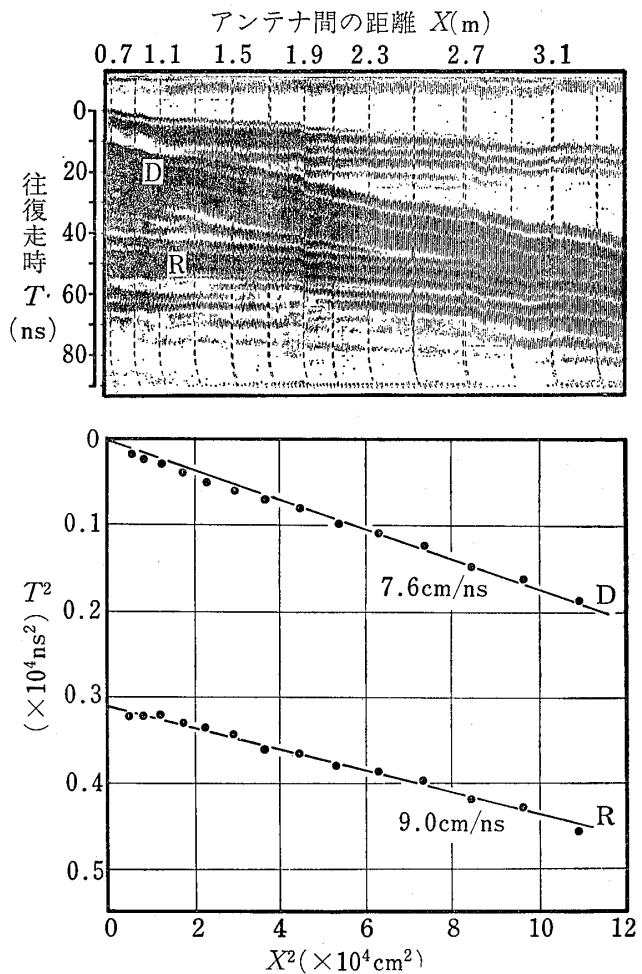


図-7 ワイドアングル測定記録と解析図
Fig. 7 Record of wide angle measurement and analyzed result

- 1) 表層部に堆積している軽石層は、間隙率が極めて大きく、かつ、排水性も良好で、したがって、軽石層の含水率がかなり小さい状態にあった(不飽和状態)。
- 2) これに対して、下部のローム層は、シルトおよび粘土を多く含む難透水性の地層であり、境界水を伴った含水率が大きい状態にあった(飽和状態)。

3-2 地盤内空洞による電磁波の反射

さきに述べた測定事例は、地盤内の層状境界における電磁波の反射に関する問題であったが、地盤内に空洞が存在し、その空洞が文字通り空気であらされている場合を考えると、そこでは土と空気とが境界面を形成していることになる。一般に、土の比誘電率は4~30(伝播速度:5~15cm/nano sec)であるのに対し、空気の比誘電率は1(伝播速度:30cm/nano sec)であり、電磁波の反射に関して、十分な誘電率の差を有しているものと考えられる。したがって、地盤内における局所的な変状を示す空洞の探査に対して、地下レーダーは有効である

と考えられる。

図-8は、盛土地盤(砂質土)中の空洞を探査するために実施した地下レーダーによるプロフィール測定記録である。この記録上には、ほぼ横方向に連続する反射面R₁およびR₂が見られ、そして、これらの反射の連続性を断ち切るような形に、局部的(測点14~15, 測定22~23)な反射が現れている。これらの局部的反射は、幅0.5~1.0m程度の極めて限られた範囲で、アーチ状を呈する独特の反射パターンを示しており、反射面形状が上に凸状の比較的明瞭な反射面が存在することを表している。これらの反射面深度は約0.3~0.4mである。

プロフィール記録上において、このようなアーチ状の反射パターンが現れた位置で開削を行ったところ、地盤内に生じている空洞が確認され、地下レーダーによる地盤内空洞の探知の可能性が検証された。図-9は、図-8に示した測点14~15の位置で確認された空洞のスケッチである。地盤内の空洞の上面深度やその形状が、地下レーダーによって精度よく示されることが分る。

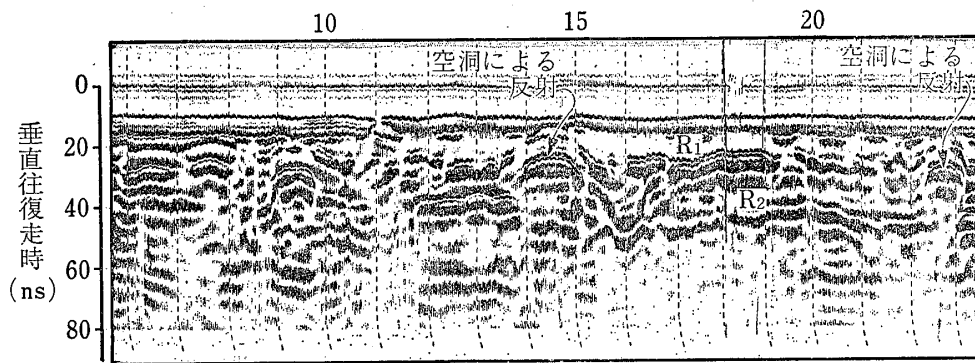


図-8 プロフィール測定記録(2)
Fig. 8 Record of profile measurement (2)

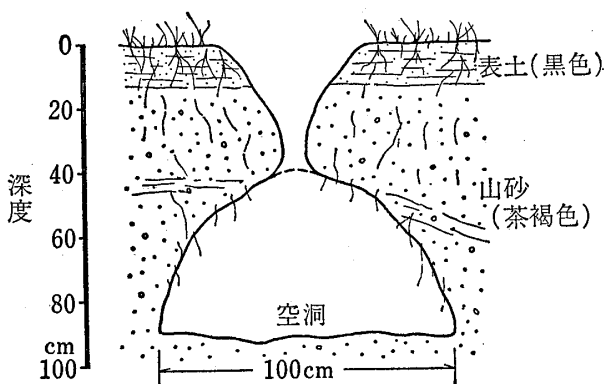


図-9 開削時の空洞スケッチ
Fig. 9 Vertical cross section determined by excavation

3-3 塩水飽和境界における電磁波の反射

地層内に塩水の浸透による高導電率の層が存在するような場合には、高導電率層内において $\sigma/\omega\epsilon \gg 1$ となり、電磁波の反射に関して、誘電率とともに導電率も関与することになる。

そこで、上層部は真水で不飽和状態であるとし、下部層が真水で飽和している場合(A)と、塩水で飽和している場合(B)を仮定し、上部層および下部層の比誘電率*, 導電率をそれぞれ表-1のように設定する。この2つの場

* 物質の誘電率を ϵ 、真空の誘電率を ϵ_0 とするととき、 ϵ/ϵ_0 を比誘電率と呼ぶ。

表-1 下部層が真水で飽和している場合と塩水で飽和している場合の反射係数比較
 Table 1 Comparison of reflection coefficients when the lower layer is saturated with fresh and salt water

		上部層			下部層		反射係数
		比誘電率	導電率		比誘電率	導電率	
A	真水 (不飽和)	9	mho/m 0.001	真水 (飽和)	25	mho/m 0.005	0.26
B	真水 (不飽和)	9	mho/m 0.001	塩水 (飽和)	25	mho/m 1	0.65

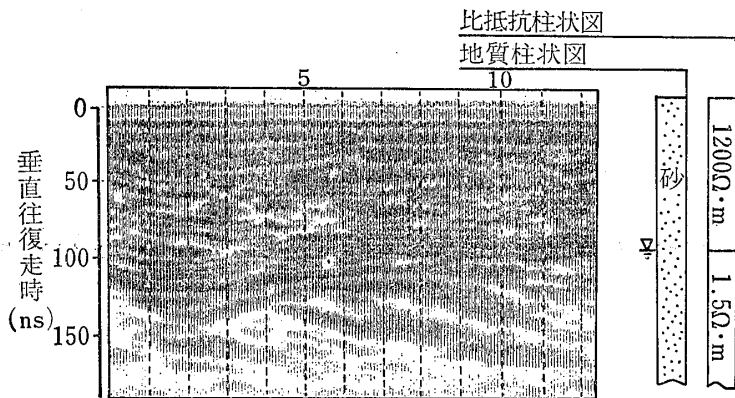


図-10 プロファイル測定記録 (3)
 Fig. 10 Record of profile measurement (3)

合における不飽和層と飽和層の境界の反射係数を(4)式によって見積ると、飽和真水の場合(A)の反射係数が0.26であるのに対し、飽和塩水の場合(B)には0.65となり、2.5倍の反射係数が得られる(電磁波の周波数は、120MHz ($\omega = 7.5 \times 10^8$)として計算した)。

上記のモデル計算に示すように、下部層の導電率が上部層にくらべて極めて大きい場合には、その境界が電磁波の強い反射面になることがわかる。

図-10は、海岸沿いの砂丘地帯において得られたプロフィール記録であり、反射 R_2 が特に顕著に記録上に現われている。ワイドアングル測定から求められた反射面 R_2 より上の層の電磁波伝播速度は9.5cm/nano secであるので、この反射面の深度は4.6mとなる。この反射面深度は、海水面とほぼ一致している。また、同時に実施した垂直電気探査によっても、深度4.5m付近に比抵抗境界(上層:1200 $\Omega \cdot m$, 下層:1.5 $\Omega \cdot m$)が得られている。これらのことから、砂層内に浸透した塩水の飽和境界面は、電磁波を明瞭に反射する面となると考えることができる。

4 地下レーダーと電気探査の併用

4-1 電磁波反射面と比抵抗境界

通常の地盤を対象とした地下レーダー測定においては、誘電率の相異による境界での反射が大部分であるが、このような場合においても、地下レーダーによって求められる反射面と、比抵抗法垂直電気探査によって求められる比抵抗値の境界とが一致することが多い。

図-11は、ローム地盤上で測定したプロフィール記録である。この記録にはいくつかの反射が現れているが、図中に R_u および R_d を付した反射は、特に明瞭に認められる。測点10から20の間におけるワイドアングル測定によって、これらの反射面の深さや、その間の媒質の電磁波伝播速度を求めると、図-12のようになる。すなわち、反射面 R_u を境として、上層の伝播速度は5.2cm/nano secであり、下層は5.5cm/nano secとなっている。また、 R_u 反射面の深度は2.7mであり、 R_d 反射面の深度は、測点10付近で3.9mである。

一方、この測点10を中心としたウェンナーの電極配置

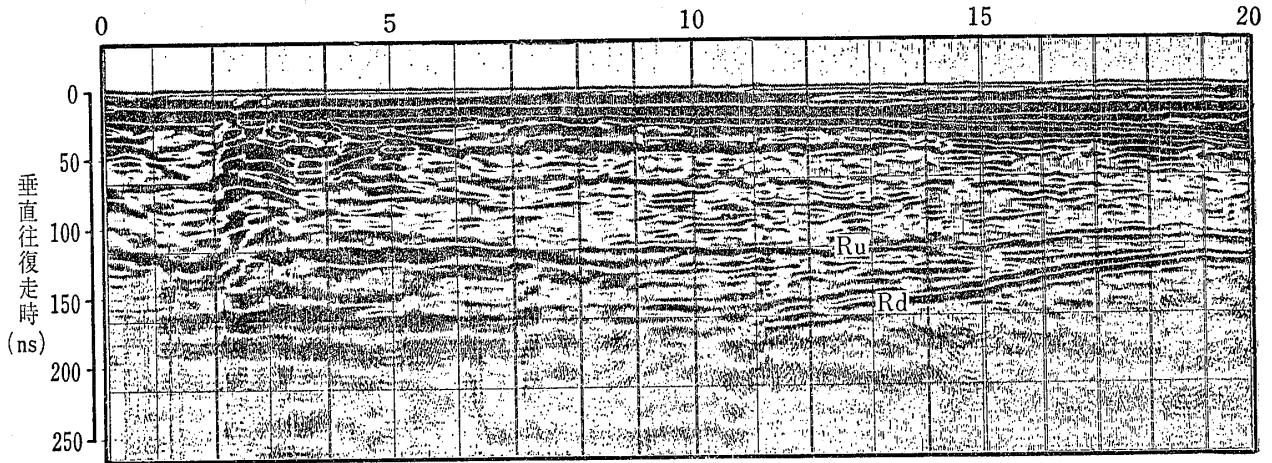


図-11 プロファイル測定記録 (4)

Fig. 11 Record of profile measurement (4)

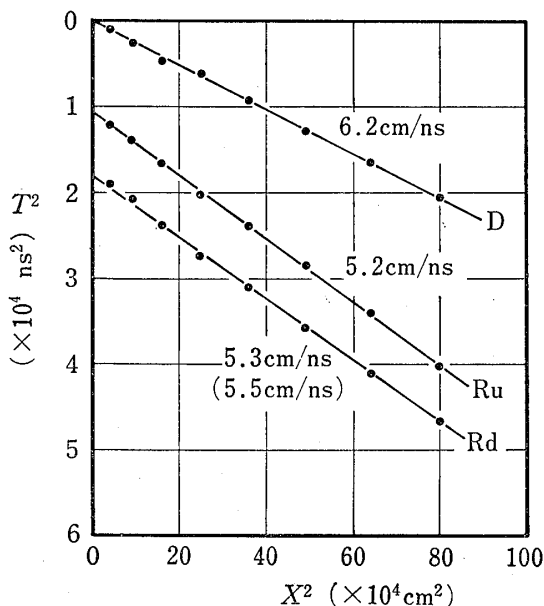
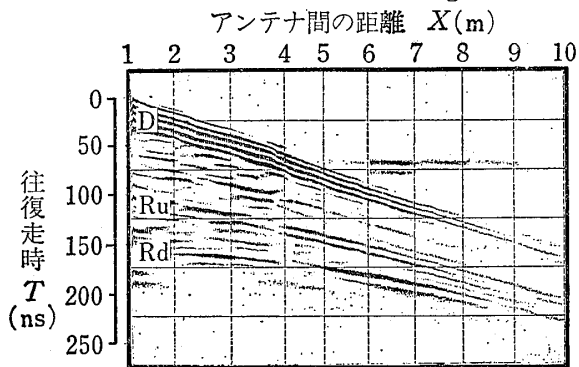


図-12 ワイドアングル測定記録と解析図

Fig. 12 Record of wide angle measurement and analyzed result

による比抵抗法垂直電気探査の結果を図-13に示す。この結果によれば、深度2.7mを境界として、上層の比抵抗値は $340\Omega \cdot m$ 、下層は $90\Omega \cdot m$ となっている。この比

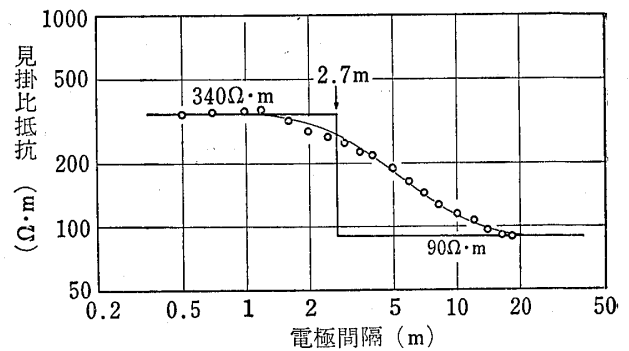


図-13 垂直電気探査結果

Fig. 13 Result from vertical electric sounding

抵抗境界は、地下レーダーによる Ru 反射面とよく一致している。

上に示した上層および下層それぞれの電磁波伝播速度および比抵抗の値を用いて、測定に使用した電磁波の周波数120MHz ($\omega = 7.5 \times 10^8$) に対する誘電正接を計算すると、上層に対しては $\sigma_1/\omega\epsilon_1 = 1.3 \times 10^{-2}$ 、下層に対しては $\sigma_2/\omega\epsilon_2 = 5.2 \times 10^{-2}$ となる。このように、上層および下層ともに $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$ である領域においても、電磁波の反射面と比抵抗境界がよく対応することは、それぞれの地層における土の性質（空隙率、含水率、粒度組成など）が異なることによって、土の誘電率が異なるばかりでなく、比抵抗も変化するためと考えられる。

4-2 電磁波伝播速度と比抵抗による土の性質の推定の可能性

一般に、不飽和土は、空気、水、土粒子から構成される混合物であるとみなすことができ、その比誘電率 ϵ_r はつぎの式で表される。

$$\sqrt{\epsilon_r} = n(1-S)\sqrt{\epsilon_{r,a}} + nS\sqrt{\epsilon_{r,w}} + (1-n)\sqrt{\epsilon_{r,s}} \quad (10)$$

ここに、 $\epsilon_{r,a}$: 空気の比誘電率
 $\epsilon_{r,w}$: 間隙水の比誘電率
 $\epsilon_{r,s}$: 土粒子の比誘電率
 n : 間隙率(%)
 S : 飽和度

そこで $\epsilon_{r,a}=1$, $\epsilon_{r,w}=81$, $\epsilon_{r,s}=4$ とし、これらの値を(10)式に代入すると、

$$\sqrt{\epsilon_r} = 8ns - n + 2 \quad (11)$$

となる。

一方、 $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$ となる領域における土の電磁波伝播速度 v は、真空中の電磁波伝播速度を 30cm/nano sec とすれば、つぎのように表される。

$$v = \frac{30}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (cm/nano sec)} \quad (12)$$

いま、土の体積含水率を V_w とすると、

$$V_w = nS \quad (13)$$

と表され、(11)式および(12)式の関係を用いると、

$$V_w = \frac{30-2v}{v} \cdot \frac{S}{8S-1} \quad (14)$$

となる。(14)式によれば、飽和度 S が分かれば、土の電磁波伝播速度から体積含水率が求められることが分かる。図-14には、飽和度 S をパラメーターとして、電磁波伝播速度 v と体積含水率 V_w の関係を示してある。

また、不飽和土の導電率 σ についても、比誘電率の場合と同様に、つぎのように表すことができる。

$$\sqrt{\sigma} = n(1-S)\sqrt{\sigma_a} + nS\sqrt{\sigma_w} + (1-n)\sqrt{\sigma_s} \quad (15)$$

ここに、 σ_a : 空気の導電率
 σ_w : 間隙水の導電率
 σ_s : 土粒子の導電率
 n : 間隙率(%)
 S : 飽和度

そこで、 $\sigma_a = \sigma_s = 0$ とすれば、(15)式は

$$\sqrt{\sigma} = nS\sqrt{\sigma_w} \quad (16)$$

となる。また、比抵抗 ($\rho = 1/\sigma$, $\rho_w = 1/\sigma_w$) を用いて表すと、

$$\sqrt{\rho} = \frac{\sqrt{\rho_w}}{nS} = \frac{\sqrt{\rho_w}}{V_w} \quad (17)$$

となる。したがって、(17)式に(14)式を代入すると、

$$\rho_w = \left(\frac{S}{8S-1}\right)^2 \left(\frac{30-2v}{v}\right)^2 \rho \quad (18)$$

が得られる。この式によれば、土の飽和度 S が分かれば、土の比抵抗と電磁波伝播速度から、間隙水の比抵抗が求められることを示している。

そこで、

$$I_f = \left(\frac{30-2v}{7v}\right)^2 \rho \quad (19)$$

で定義される土の比抵抗と、電磁波伝播速度から求められるインデックス I_f を用いると、(18)式は、

$$\rho_w = \left(\frac{7S}{8S-1}\right)^2 I_f \quad (20)$$

と表すことができ、飽和度 $S=1$ のとき、間隙水の比抵抗 ρ_w の値は、このインデックス I_f の値と一致する。

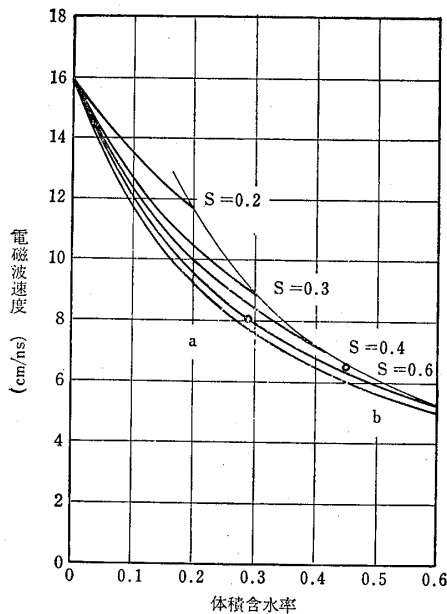


図-14 体積含水率と電磁波速度の関係

Fig. 14 Relationship between moisture content and velocity of electromagnetic waves

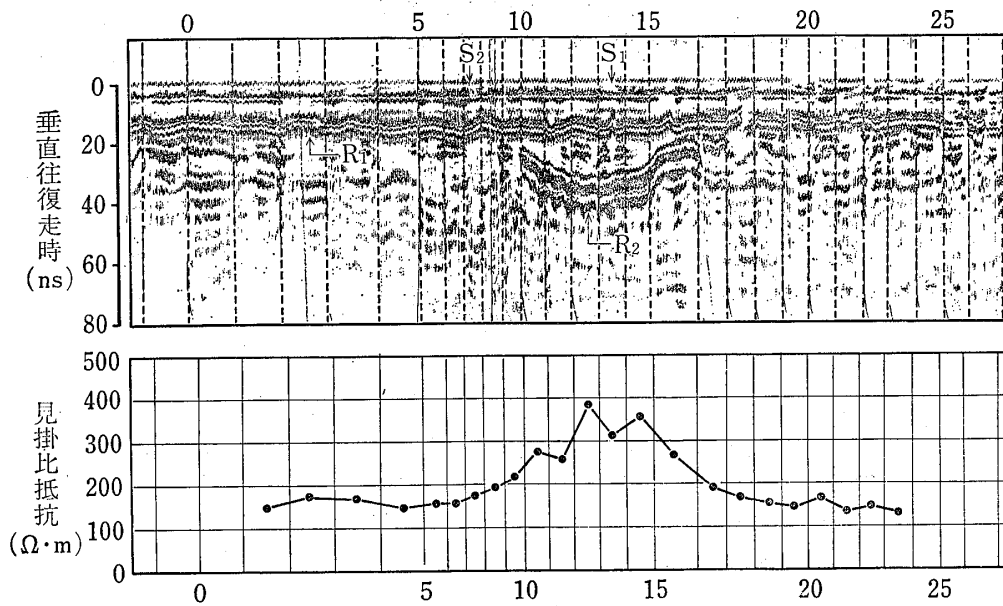


図-15 プロファイル測定記録と水平電気探査結果

Fig. 15 Comparison of results from radar measurement and electric profiling

間隙水の比抵抗の値が間隙水に含まれるイオン濃度によって支配されることは周知のことであるが、そのほかに土粒子の表面伝導の影響を受けることが考えられる。すなわち、シルトや粘土のような粒径が小さく、表面積が大きい粒径成分の混入率によって支配されると考えるものである。

平坦なローム台地上で行った地下レーダーによるプロファイル測定記録と、比抵抗法水平電気探査による見掛け比抵抗値の変化を図-15に示す。水平電気探査の電極の配置はウェンナー配置で、電極間隔は1mとした。図-15に示す地下レーダーのプロファイル測定記録によれば、全測線にわたってほぼ水平な反射 R_1 が認められ、さらに、測点10~16の範囲においては、反射 R_1 の下に、明瞭なくぼみ状の反射 R_2 が認められる。このようなくぼみ状の反射パターンは、くぼみ状の構造の存在によって生ずるものである。一方、図-15の見掛け比抵抗値の変化状況を見ると、上記のくぼみ状の反射パターンに対応するように、測点10~16の範囲の値が、その前後にくらべて高い値を示している。このような両法による測定結果を総合すると、測点10~16に存在する局所的なくぼみ状の構造の中に、周辺にくらべて高比抵抗の物質が存在するものと考えられる。そこで、図-15に示す S_1 および S_2 の地点において比抵抗法垂直電気探査を実施した。その結果、このくぼみ状構造の内部の比抵抗値は $730\Omega\cdot m$ であり、その外側の比抵抗値は $80\Omega\cdot m$ であることが分かった。これらの結果によって、測定10~16付

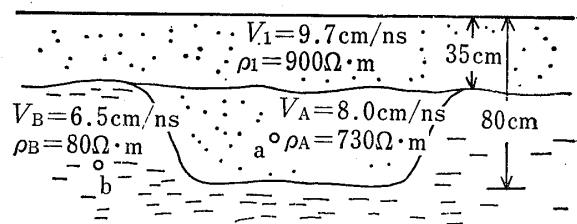


図-16 測定地点の模式構造図

Fig. 16 Vertical cross section along measuring line

近の構造を模式的に示すと図-16のようになり、その後実施された開削調査によって、このくぼみ状の構造は、古代の堅穴式住居遺跡であることが確認された。

この住居遺跡内(A)のa点および住居遺跡外(B)のb点から採取したサンプルの土質試験結果によれば、住居遺跡内の土は、周囲のローム層に比べて、やや砂分に富み、低含水率となっている。

表-2は、地下レーダーおよび電気探査による結果を土質試験の結果と対比したものである。ここに、添字Aは住居遺跡内部の土を、添字Bは住居遺跡の外側の土を表している。電磁波伝播速度に関して、 $v_A > v_B$ であるのに対して、体積含水率は $V_{w,A} < V_{w,B}$ となっており、これは図-14に示した電磁波伝播速度と体積含水率の理論的關係と調和している。また、インデックス値に関しては、 $I_{f,A} > I_{f,B}$ に対して、シルト・粘土含有率が $P_{m,c,A} < P_{m,c,B}$ となっており、これはインデックス値および間隙水の比抵抗と同様に、粒度組成との間に負の關係があ

表-2 A, B地点の土質常数対比表
Table 2 Comparison of physical properties of soil between A and B

試料採取地点	電磁波速度	比抵抗	If値	粒度組成		自然含水比	間隙比	飽和度	体積含水率
				シルト粘土分	砂分				
a	cm/nsec 8.0	Ω・m 730	45.6	21.5%	78.5%	30.1%	1.773	45.7%	29.2%
b	cm/nsec 6.5	Ω・m 80	11.2	36.5%	63.5%	64.2%	2.701	62.3%	45.4%

ることを暗示するものである。

以上に示したように、電磁波伝播速度値と比抵抗値が、ともに土の性質の違いを反映していると考えられることから、これら両者を組み合わせることによって、より適確に土の性質を推定することの可能性を示唆していると考えられる。

5 地下レーダーの適用性とその限界

地盤内を伝播する電磁波は、主に誘導率の変化する境界、すなわち、土の含水率の変化する境界において反射することができる。このような含水状態の変化する面としては、砂質土層と粘性土層などの地層境界面や土質境界面のほかに、地下水浸潤面、盛土内の締め固め状態の急変面などが考えられる。また、電磁波反射面と比抵抗境界面とは対応していることが多く、したがって、地下レーダーと電気探査とを併用することは、地層の性質を把握するための有効な手段となる。一方、地下レーダーのもつ高分解能性は、地盤内に局部的に存在する空洞などの探知に威力を発揮するものである。

このように、地下レーダーは土質地盤に対して多様な適用性を有しているが、地下レーダーにとっての最大の障害は、地盤内において電磁波の減衰が著しいことである。誘電正接 $\sigma/\omega\epsilon$ がより十分小さいという条件下においては、電磁波の減衰定数 α は、電磁波伝播速度に比例し、比抵抗に反比例するものである。実際に観測される地盤中の電磁波伝播速度は、5~15cm/nano sec の範囲にあって、その値の変化範囲が小さい。これに対して、比抵抗の方は、その値の変化範囲は極めて広く、減衰定数は主として比抵抗によって支配されるということが出来る。すなわち、比抵抗の小さいものほど減衰定数は大きくなり、探査可能な深度は小さくなる。

減衰定数 α の地盤における探査可能深度 D は、レーダー方程式から導かれ、つぎのように表される。(付録2参照)

$$10\log \frac{Pr_{min}}{Pt_{max}} \cong \text{const} - 28.0 + 20\log \frac{\lambda R}{D} - 17.4\alpha D \quad (21)$$

そこで、現在使用している地下レーダー装置のシステム係数は、

$$10\log \frac{Pr_{min}}{Pt_{max}} = -120(\text{dB}) \quad (22)$$

$$\text{const} = 10\log(E_t \cdot E_r \cdot G_t \cdot G_r) = -22(\text{dB})$$

と設定することができるので、(21)式はつぎのようになる。

$$70 = 17.4\alpha D - 20\log \frac{\lambda R}{D} \quad (23)$$

ここに、 λ : 電磁波の波長

R : 反射係数

(23)式に減衰定数に関する近似式

$$\alpha = \frac{\mu_0 v}{2\rho} \quad (\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}) \quad (24)$$

を代入すると、

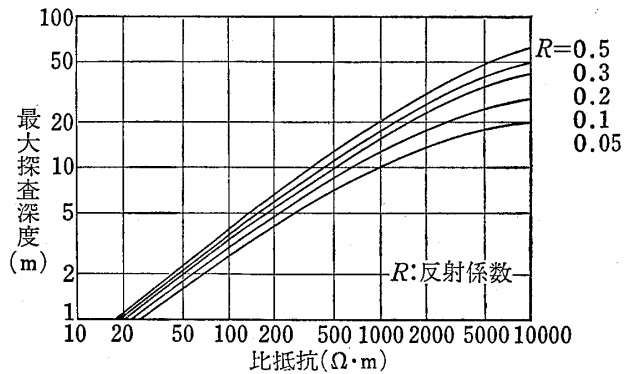


図-17 比抵抗と最大可探深度の関係
Fig. 17 Relationship between resistivity and maximum probing distance

$$70 = 109 \frac{vD}{\rho} - 20 \log \frac{\lambda R}{D} \quad (25)$$

が得られる。ここに使用する単位は、 v [cm/nano sec], D [m], ρ [$\Omega \cdot m$], λ [m] である。(25)式において、 $f = 100\text{MHz}$, $v = 10\text{cm/nano sec}$ としたときの比抵抗 ρ と探査可能深度 D の関係を反射係数 R をパラメータとして示すと、図-17のようになる。これによれば、探査可能深度は、比抵抗が $100\Omega \cdot m$ 程度の地盤では $3 \sim 4\text{m}$ であり、 $1000\Omega \cdot m$ 程度の地盤では $10 \sim 20\text{m}$ になることが分かる。

6 あとがき

地下レーダーは、地層構造や土質構造の把握だけでなく、空洞などの局部的異常の検出にも十分対応できる高い分解能を有している。また、電磁波の伝播速度や減衰は、土の含水率や比抵抗と密接な関係があり、これらのことは土の性質を把握する上で有力な情報となるものである。したがって、地下レーダーは、土質地盤に対する適用性という面で、多くの可能性を持っているものである。しかしながら、地下レーダーを土質地盤における有力な探査手法として、その実用化をさらに進めるためには、地下レーダーによって得られる情報の解析法、処理法の開発、他の調査法との併用による信頼度向上の問題、また、電磁波の減衰の大きい地盤に対する探査深度の拡大問題をも含め測定器の改善など、地下レーダーの適用性を拡大するために解決しなければならない多くの課題があり、今後、これらの課題を順次解明してゆく所存である。

参考文献

- ③ Annan, A. P. and J. L. Davis (1976): Impulse Radar Sounding in Permafrost, Radio Science, Vol. 11, pp. 383-394
- ⑨ Annan, A. P. and J. L. Davis (1977): Radar Range Analysis for Geological Materials, Report of Activities, Geologic Survey of Canada, Paper 77-113, pp. 117-124
- ⑤ Benson, R. C. and R. Glaccum (1979): Radar surveys for Geotechnical site assessment, Geophysical Methods in Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, Atlanta, GA.
- ④ Campbell, K. J. and A. S. Orange (1974): A continuous Profile of Sea Ice and Freshwater Ice Thickness by Impulse Radar, Polar Record, Vol. 17, no. 106, pp. 31-41
- ① Cook, J. C. (1960): Proposed Monocycle-pulse VHF Radar for Airborne ice and snow measurement, AIEE Comm. and Electronics, no. 51, p. 588-594
- ② Cook J. C. (1975): Radar Transparencies of Mine and Tunnel Rocks, Geophysics, Vol. 40 pp. 865-875
- Donaldson, C. A. (1953): Underground Prospecting System, U. S. Patent 2, 657, 380
- Evans, S. (1963): Radio techniques for the measurement of ice thickness, The Polar Record, VII, pp. 406-410 and 795
- 原徹夫, 坂山利彦, 栗田好文 (1982): 電磁波反射法による地下探査, 物理探査学会昭和57年春季講演会講演予稿集
- 原徹夫, 坂山利彦 (1982): 電磁波反射法による地下探査(その2) - ワイドアングル測定 - 物理探査学会昭和57年秋季講演会講演予稿集
- 原徹夫, 坂山利彦, 長田正樹 (1983): 電磁波反射法による地下探査(その3) - 探査深度 - 物理探査学会, 昭和58年春季講演会講演予稿集
- 原徹夫, 坂山利彦 (1983): 電磁波反射法による地下探査(その4), 物理探査学会, 昭和58年秋季講演会講演予稿集
- Harrison, C. H. (1970): Reconstruction of subglacial relief from radio sounding echoes, Geophysics, Vol. 35, pp. 1099-1115
- Melton, B. S. (1937): Electromagnetic Prospecting Method, U. S. Patent 2, 077, 707
- Morey, R. M. (1972): Geological Survey System, U. S. Patent 214, 933
- ② Morey, R. M. (1974): Continuous Subsurface Profiling by Impulse Radar, Proc. of Engineering Foundation Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction, pp. 213-232
- 岡本敬一 (1971): VHF電波探査法について, 物理探査, Vol. 24, no. 4, pp. 188-197
- Porcello, L. J. (1974): The Apollo Lunar Sounder Radar System, Proc. IEEE, Vol. 62, no 6, pp. 769-783
- ④ Stewart, R. D. and R. R. Unterberger (1976): Seeing Through Rock Salt with Radar, Geophysics,

Vol. 41, pp. 123-132

- 鈴木務, 荒井郁男, 堀田展弘, 堀越義明, 木下晃, 野津俊光 (1979): 地下探索レーダシステム, 電気通信学会, 技術研究報告, no. 220, pp. 21~28
- 高木英夫, 北原良哉 (1971): マイクロ波による地層内異常物の探査について, 第1報, 日本鉱業会, 昭和46年度春季大会講演集
- 高木英夫, 北原良哉 (1973): マイクロ波による地層内異常物の探査について, 第2報, 日本鉱業会, 昭和48年度春季大会講演集

付録1 導電性媒質における電磁波の伝播と反射

均質等方媒質内の正弦振動電磁波に対するマックスウェル方程式を解くと, 電場 \vec{E} および磁場 \vec{H} について, つぎのヘルムホルツ・ベクトル方程式が得られる。

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (2)$$

(1)式および(2)式の解として, Z方向に伝播するx方向偏波の平面波を考えると, つぎの波動解が得られる。

$$E_x = E_0 e^{j(\omega t - kz)} \quad (3)$$

$$H_y = H_0 e^{j(\omega t - kz)} \quad (4)$$

導電性媒質中においては, 伝播定数 k は複素数となり,

$$k = \omega \sqrt{\mu \left(\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \right)} = \beta - j\alpha \quad (5)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right)} \quad (6)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} + 1 \right)} \quad (7)$$

と表される。

ここに, ω : 角周波数 ($=2\pi f$)

μ : 透磁率

ϵ : 誘電率

σ : 導電率

なお, α は減衰定数, β は位相定数と呼ばれている。

(5)式を(3)式および(4)式に代入すると,

Unterberger, R. R. (1974) Electromagnetic wave propagation in rock salt, Pro. 4th sympos. on salt

Watts, R. D. and D. L. Wright (1981): Systems for Measuring Thickness of Temperate and Polar Ice from the Ground or From the Air, Journal of Glaciology, Vol 27, pp. 459-469

$$E_x = E_0 e^{-\alpha z} \cdot e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (8)$$

$$H_y = H_0 e^{-\alpha z} \cdot e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (9)$$

となり, 導電性媒質中における電磁波は, $e^{-\alpha z}$ で減衰しながら, ω/β の速度で伝播することを知らることができる。

また, 媒質1と媒質2の境界に対して垂直に入射した電磁波のその境界面における反射係数 R_{\perp} は, 次式で表される。

$$R_{\perp} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \frac{n}{n} \quad (10)$$

$$n = \frac{K_2}{K_1} = \frac{\sqrt{\mu_2 \left(\epsilon_2 + \frac{\sigma_2}{j\omega} \right)}}{\sqrt{\mu_1 \left(\epsilon_1 + \frac{\sigma_1}{j\omega} \right)}} \quad (11)$$

ここに, n は相対屈折率と呼ばれている。(1)式を(10)式に代入して書き直すと, つぎのように表される。

$$R_{\perp} = \frac{\sqrt{(a^2 - b^2)^2 + (2ab \sin \phi)^2}}{a^2 + b^2 + 2ab \cos \phi} e^{j\phi} \quad (12)$$

ここに,

$$\phi_{\perp} = \tan^{-1} \frac{2ab \sin \phi}{a^2 - b^2} \quad (13)$$

$$a = \mu_2 / \mu_1 \quad (14)$$

$$b = \frac{\sqrt{\mu_2 \epsilon_2 \sqrt{1 + (\sigma_2 / \omega \epsilon_2)^2}}}{\mu_1 \epsilon_1 \sqrt{1 + (\sigma_1 / \omega \epsilon_1)^2}} \quad (15)$$

$$\phi = \tan^{-1} (-\sigma_2 / \omega \epsilon_2) - \tan^{-1} (-\sigma_1 / \omega \epsilon_1) \quad (16)$$

付録2 レーダー方程式

レーダーの受信電力 P_r は、次式のように表される。

$$P_r = P_t \cdot E_t \cdot E_r \cdot G_t \cdot G_r \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot L_s \cdot L_a \cdot L_r \quad (17)$$

- ここに、
 P_t : 送信電力
 E_t : 送信効率
 E_r : 受信効率
 G_t : 送信アンテナ利得
 G_r : 受信アンテナ利得
 L_s : 拡散損失
 L_a : 吸収損失
 L_r : 反射体の反射散乱損失

(17)式はレーダー方程式と呼ばれているものである。

そこで、受信可能な最小電力を $Prmin$ 、最大送信電力を $Ptmax$ によって表すと、レーダーによって反射体を検出することが可能な条件は、

$$\frac{Prmin}{Ptmax} \leq E_t \cdot E_r \cdot G_t \cdot G_r \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot L_s \cdot L_a \cdot L_r \quad (18)$$

となる。ここに、 $Prmin/Ptmax$ は探査装置のシステム係数と呼ばれる、(18)式の右辺のうち、 $E_t \cdot E_r \cdot G_t \cdot G_r$ は装置の特性によって決まる定数とみなすことができるので、(18)式は、

$$\frac{Prmin}{Ptmax} \leq \text{const} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot L_s \cdot L_a \cdot L_r \quad (19)$$

と表すことができる。そこで、

$$L_s = \left(\frac{1}{4\pi D^2} \right)^2 \quad (20)$$

$$L_a = (e^{-2\alpha D})^2 \quad (21)$$

$$L_r = R^2 S \quad (22)$$

とおくと、(19)式はつぎのようになる。

$$\frac{Prmin}{Ptmax} \leq \text{const} \cdot \frac{\lambda^2 R^2 S}{64\pi^3 D^4} e^{-4\alpha D} \quad (23)$$

- ここに、
 R : 反射係数
 D : 反射面までの距離
 S : 散乱有効断面積

反射面がかなりの拡がりを持ち、平滑である場合には、

$$S = \pi D^2 \quad (24)$$

となり、したがって、(23)式は、

$$\frac{Prmin}{Ptmax} \leq \text{const} \cdot \frac{\lambda^2 R^2}{64\pi^2 D^2} e^{-4\alpha D} \quad (25)$$

となり、両辺の対数をとると、

$$10 \log \frac{Prmin}{Ptmax} \leq \text{const} - 28.0 + 20 \log \frac{\lambda R}{D} - 17.4 \alpha D \quad (26)$$

となる。

