

# 遺跡探査に対する地下レーダの適用性向上のための アンテナ特性と分解能の検討

坂山利彦・兼崎幸雄・田村晃一

## Examination of Antenna Characteristics and Resolution for Improving Applicability of Ground-probing Radar to Archaeological Investigation

Toshihiko SAKAYAMA, Yukio KANEZAKI and Koichi TAMURA

### Abstract

Ground-probing radar is an underground exploration system by the reflection method. Electromagnetic waves are radiated into the ground from the transmitting antenna installed on the ground, and these radiated electromagnetic waves are reflected by the boundary of strata or by the surface of buried objects; these reflected electromagnetic waves return to the ground surface, and are caught by the receiving antenna, thereby permitting exploration of the underground condition.

Even in the case of a soil ground which gives good applicability of the ground-probing radar, the explorable depth by the radar is about 3 to 4 m into the ground. Therefore, the ground-probing radar has been used for investigating pipe systems buried in the shallow depth and cavities under the road. Further, the buried depth of most archaeological remains in Japan is only about 1 to 2 m in the ground, and the ground-probing radar has come to be used in order to explore the distribution condition of the remains.

Now, the archaeological exploration in which the buried depth is shallow, it is necessary to grasp more finely the changes in the piling-up condition of ground by enhancing exploration resolution of the ground-probing radar. In order to achieve this, it is important to make the frequency of electromagnetic waves radiated from the transmitting antenna of the ground-probing radar as high as possible and at the same time to increase the radiation intensity of electromagnetic waves from the transmitting antenna at that time.

This report clarifies, using experiments, in what way the frequency and radiation efficiency of electromagnetic waves change depending upon the length of the transmitting antenna and the width of the transmitting pulse, and examine the effect of an increase in the frequency exercised on exploration resolution.

According to experimental results, the frequency of electromagnetic waves radiated from the transmitting antenna into the ground becomes higher, as the length of the transmitting antenna is made smaller and as the dielectric constant of the object ground is larger. On the other

hand, the amplitude of the electromagnetic wave radiated from the transmitting antenna becomes smaller, as the length of the transmitting antenna is made smaller. These facts indicate that it is necessary to select the length of the transmitting antenna and the width of the transmitting pulse depending upon the ground.

Further, it has been found out that for a certain length of the transmitting antenna, there is a transmitting pulse width which makes the amplitude of the radiated electromagnetic wave maximum, and the combination of the length of the transmitting antenna and the transmitting pulse width is important.

In actual exploration, it is necessary to enhance exploration resolution and at the same time to cause the electromagnetic wave to permeate to the depth aimed at, and it is important to use the transmitting antenna matched with the objective. In the result of actual archaeological explorations, satisfactory results have been obtained by the exploration using the combination of a length of the transmitting antenna of 21 cm and a transmitting pulse width of 2 nsec. The frequency of the electromagnetic wave radiated by this combination varies also with the kinds of ground, and is about 200 to 250 MHz.

## 1 まえがき

日本には、旧石器時代以降の埋蔵遺跡が広く分布しており、埋蔵遺跡は日本の歴史や文化を知るうえで重要な情報を提供している。しかし、近年の経済活動の発展に伴って国土開発が活発化し、これらの遺跡は開発工事によって破壊される運命にある。このような状況に対処するため、遺跡地においては、開発工事に先立って発掘調査が行われ、現在、開発工事に伴う緊急発掘調査は、年間2万5千件以上に達している。

発掘調査の件数の増加に伴い発掘調査を効率よく進めるため、最近では物理探査による事前調査が行われている (Imai et al, 1987, Sakayama et al, 1988)。物理探査によって得られた地下情報に基づいて、適切な発掘計画が立てられ、迅速かつ経済的な調査ができるようになった。特に、地下レーダによる探査は大きな効果을上げている (坂山ほか, 1990)。

地下レーダが開発された当初には、主として、比抵抗の高い地盤や岩盤を対象として用いられており、永久凍土の厚さの測定 (Annan et al., 1976)、岩塩構造の調査 (Stewart et al., 1976) などによって、レーダの利用効果について報告されている。このような高比抵抗の岩盤などでは、地下レーダによって深さ数十mまでの探査が可能であるが、一方、比抵抗が比較的低い土質地盤では、探査深度はたかだか3~4m程度であり (原ほか, 1983)、主に、都市における埋設管の調査や地下空洞の調査などに利用されてきた。

ところで、日本における遺跡の埋蔵深度は1m~2mと浅く、また、探査の対象となる遺構の規模も比較的小さいものが多いために、遺跡探査においては、深度に対

する高い分解能が必要となる。したがって、遺跡探査に対する地下レーダの適用性を高めるためには、地下レーダの送信アンテナから放射される電磁波の周波数を可能な限り高くして探査分解能を向上させること、さらに、その際の送信アンテナからの電磁波の放射強度を高めることが重要である。

本報文では、地下レーダの送信アンテナから放射される電磁波の周波数および放射効率、アンテナの寸法や送信パルスによってどのように変化するかを実験によって明らかにし、周波数を高くすることによる探査分解能に対する効果を検討した結果について述べる。

## 2 送信アンテナの特性を把握するための実験

地下レーダは電磁波を利用した反射法地下探査装置であって、地表に設置した送信アンテナから地中に向けて電磁波を放射し、この放射された電磁波が、地層の境界面あるいは埋蔵物の表面などから反射して、地表に戻ってきたものを受信アンテナで捉え、これによって地下の状況を探るものである (Morey, 1974, 原ほか, 1983)。

地下レーダで使用されているアンテナは、図-1に示すように三角形をしたボウタイ (bow-tie) アンテナである。これに注入する電磁パルスは、図-2に示すように、パルス幅が狭く、立ち上がり時間が短いモノパルスである。送信アンテナから放射される電磁波の周波数は、アンテナの寸法 (ダイポール長)  $L$  とこのアンテナに注入される電磁パルスのパルス幅  $\tau$  によって決定されるものである (木村ほか, 1992)。

送信アンテナの寸法とアンテナに注入する電磁パルスのパルス幅の組み合わせによって、地盤中に放射される

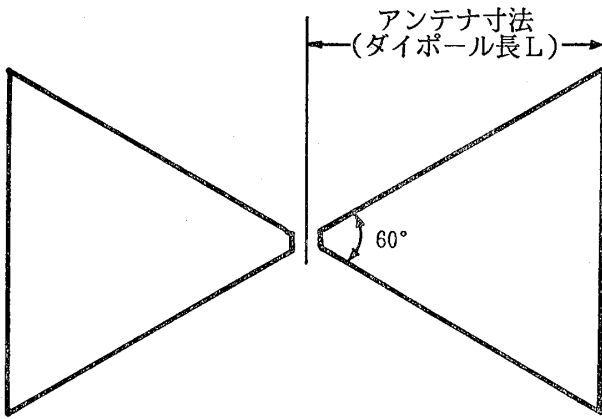


図-1 地下レーダのアンテナ形状  
Fig.1 Antenna shape of ground-probing radar

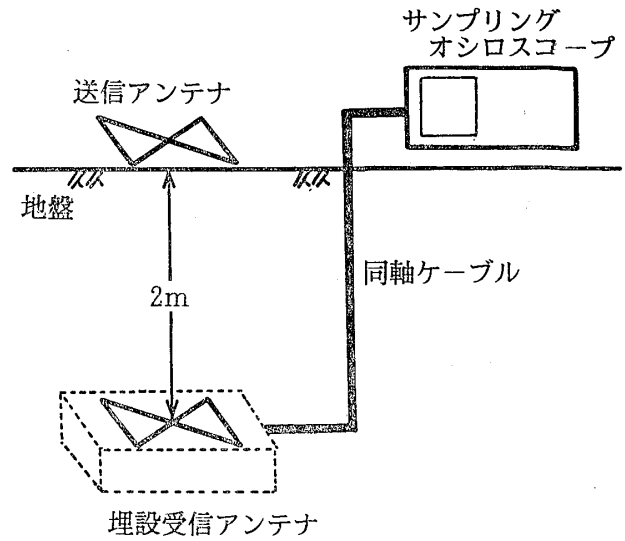


図-3 放射電磁波の測定方法  
Fig.3 Method for measuring radiated electromagnetic wave

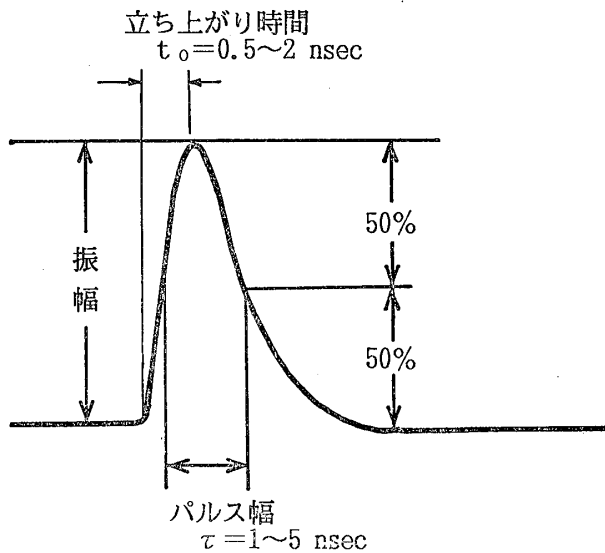


図-2 送信パルス波形  
Fig.2 Waveform of transmitting pulse

表-1 実験地盤の特性  
Table 1 Characteristic constant of soil at explored ground

	砂質土	ローム
含水比 (%)	19.9	85.3
飽和度 (%)	57.6	66.6
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.37	0.60
比抵抗 (Ω·m)	336	192
比誘電率 (ε <sub>r</sub> )	16	38
電磁波速度 (cm/ns)	7.5	4.9
減衰定数	0.14	0.16

電磁波の周波数および振幅がどのように変化するかを把握するために、つぎのような実験を実施した。

図-3に示すように、地盤中における電磁波を捉えるための受信用アンテナを地中に埋設し、この埋設受信アンテナの直上の地表面に送信アンテナを設置した。そして、この地表面の送信アンテナから放射される電磁波を埋設受信アンテナで受信する。埋設受信アンテナは、送信アンテナからの電磁波を広帯域にわたって受信できるように、20MHz~700MHzの範囲でフラットな周波数特性を示すものを使用した。

実験に使用した送信アンテナの寸法(8種類)と送信パルス幅(5種類)は下記の通りで、それらの種々の組み合わせによって送信し、放射電磁波の周波数および振幅の測定をおこなった。

送信アンテナ寸法…… 5 cm, 10cm, 12cm, 14cm, 16cm, 20cm, 24cm, 32cm

送信パルス幅…… 1 ns, 2ns, 3.5ns, 5ns, 10ns

なお、地盤中を伝播する電磁波の周波数や振幅は、地盤の種類によっても変化することが考えられるので、砂地盤とローム地盤の両者において実施した。それらの地盤の諸常数は表-1に示す通りである。

### 3 送信アンテナから放射される電磁波の特性

#### (1) 放射電磁波の周波数について

図-4は、送信パルス幅をパラメータとして、送信アンテナ寸法に対する放射電磁波の周波数の変化を示した

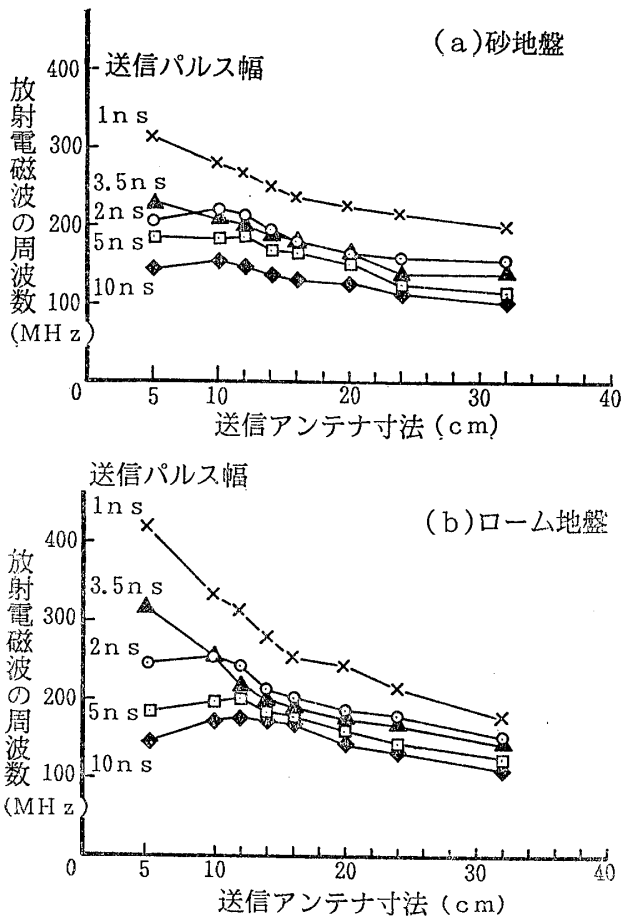


図-4 送信アンテナ寸法による放射電磁波の周波数変化  
Fig.4 Frequency change in radiated electromagnetic wave due to length of transmitting antenna

ものである。

この結果によれば、砂地盤およびローム地盤のいずれの場合も、送信パルス幅を一定とした場合、地盤中に放射される電磁波の周波数は、送信アンテナの寸法が大きいくほど小さくなり、また、送信アンテナ寸法を一定とした場合には、送信パルス幅が大きいくほど電磁波の周波数は小さくなっている。したがって、周波数の高い電磁波を放射するためには、送信アンテナの寸法を小さくすると共に、送信パルス幅を小さくすることが効果的であることがわかる。

しかしながら、砂地盤とローム地盤の放射電磁波の周波数を比較すると、送信アンテナ寸法と送信パルス幅の組み合わせが同じであっても、砂地盤の方がローム地盤よりも全体的に小さくなっている。

地盤が異なれば放射される電磁波の周波数が異なっている。今回の測定結果では、誘電率の小さい(伝播速度の大きい)砂地盤のほうが周波数は低いことを示している。このことは伝播速度の大きい地盤ほど送信アンテナの寸法を小さく、送信パルス幅を狭くする必要があるこ

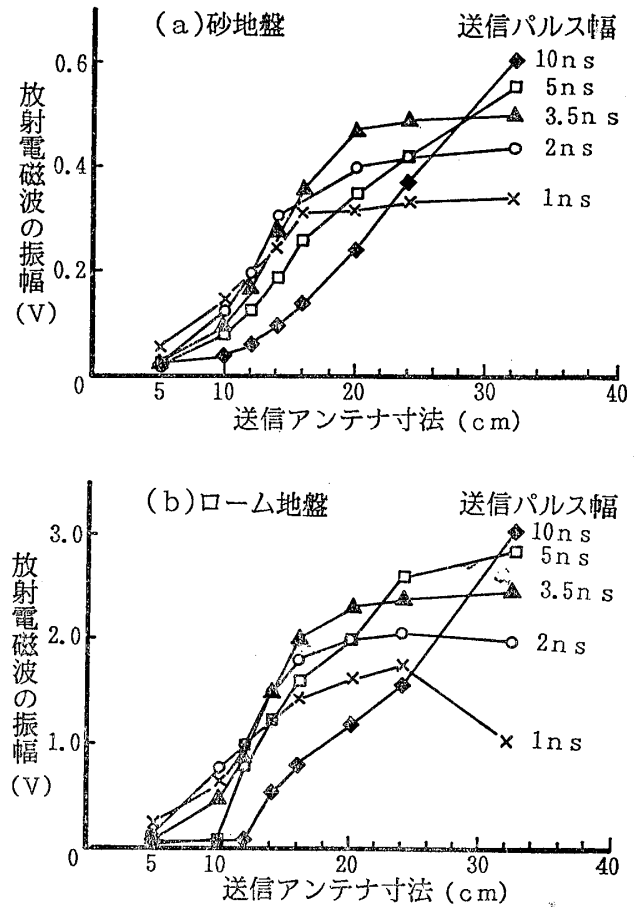


図-5 送信アンテナ寸法による放射電磁波の振幅変化  
Fig.5 Amplitude change in radiated electromagnetic wave due to length of transmitting antenna

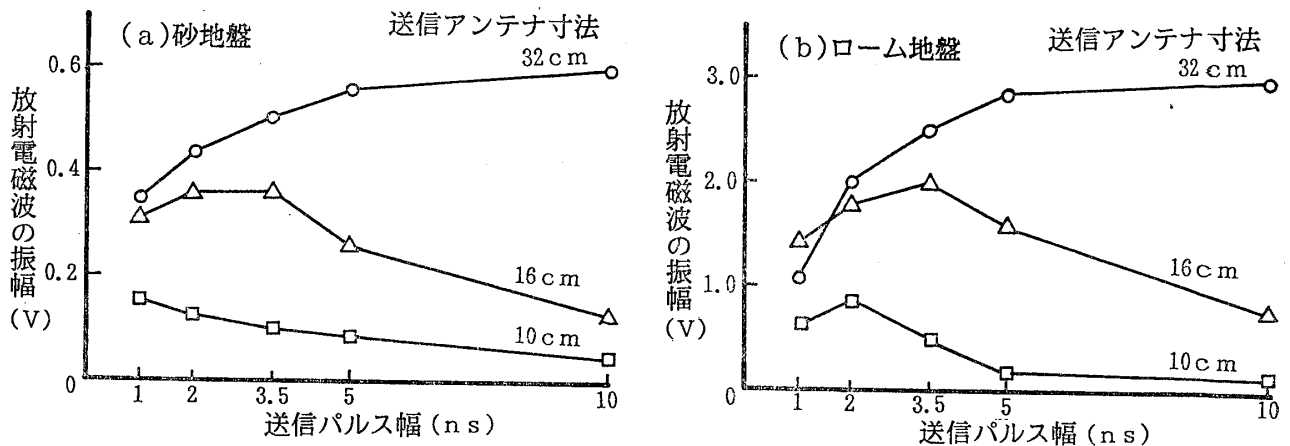
とを示している。

## (2) 放射電磁波の振幅について

図-5は、送信パルス幅をパラメータとして、送信アンテナ寸法に対する放射電磁波の振幅の変化を示したものである。

この結果によれば、送信アンテナ寸法と送信パルス幅が同じである場合、ローム地盤の放射電磁波の振幅は、砂地盤のその約5倍の値を示しているが、それらの曲線はきわめて類似した形態を示している。

また、砂地盤およびローム地盤のいずれの場合も、送信パルス幅を一定とした場合、地盤中に放射される電磁波の振幅は、送信アンテナ寸法が大きいくほど大きくなる傾向を示し、さらに、両者ともに、送信アンテナ寸法が小さいときには、パルス幅が小さいほど、電磁波の振幅は大きい値を示しているが、送信アンテナ寸法が25cmを越えるあたりから、その関係が逆になっている。このことは、送信アンテナ寸法に応じて、電磁波の振幅を最大にするパルス幅が存在することを示している。たとえば、砂地盤においては、つぎの関係にある場合電磁波の



図一六 送信パルス幅による放射電磁波の振幅変化

Fig.6 Amplitude change in radiated electromagnetic wave due to transmitting pulse width

振幅が最大値を示している。

送信アンテナ寸法	パルス幅
5~10cm	1 nsec
12~14cm	2 nsec
16~26cm	3.5nsec
28cm以上	10nsec

(3) 送信パルス幅と放射電磁波の振幅との関係

図一六は、送信アンテナ寸法をパラメーターとした場合の送信パルス幅に対する放射電磁波の振幅の関係を示したものである。この場合も、砂地盤とローム地盤の曲線の形態は類似している。

この結果によれば、送信アンテナ寸法が10cmの場合は、送信パルス幅が1~2 nsec のとき放射電磁波の振幅は最大であり、16cm の場合は2~3 nsec、32cm の場合は5 nsec 以上において最大値となっている。したがって、送信アンテナの寸法が大きくなると、放射電磁波の振幅を最大にする送信パルス幅も大きくなるのがわかる。このことは、送信アンテナの寸法にあった最適の送信パルス幅が存在することを示しており、したがって、放射電磁波の振幅を効率よく受信するためには、送信アンテナの寸法に応じたパルス幅を選択することが必要であることを示唆している。

4 アンテナ寸法およびパルス幅と探査性能の関係

送信アンテナの寸法と送信パルス幅の組み合わせによって、地盤中に放射される電磁波の周波数や振幅が変化することを実験によって定量的に把握した。

実際に探査を実施する場合には、送信アンテナから放射される電磁波の周波数によって、分解能や透過力がどのように変化するかを見定めて、適切な送信アンテナを

選択することが肝要である。

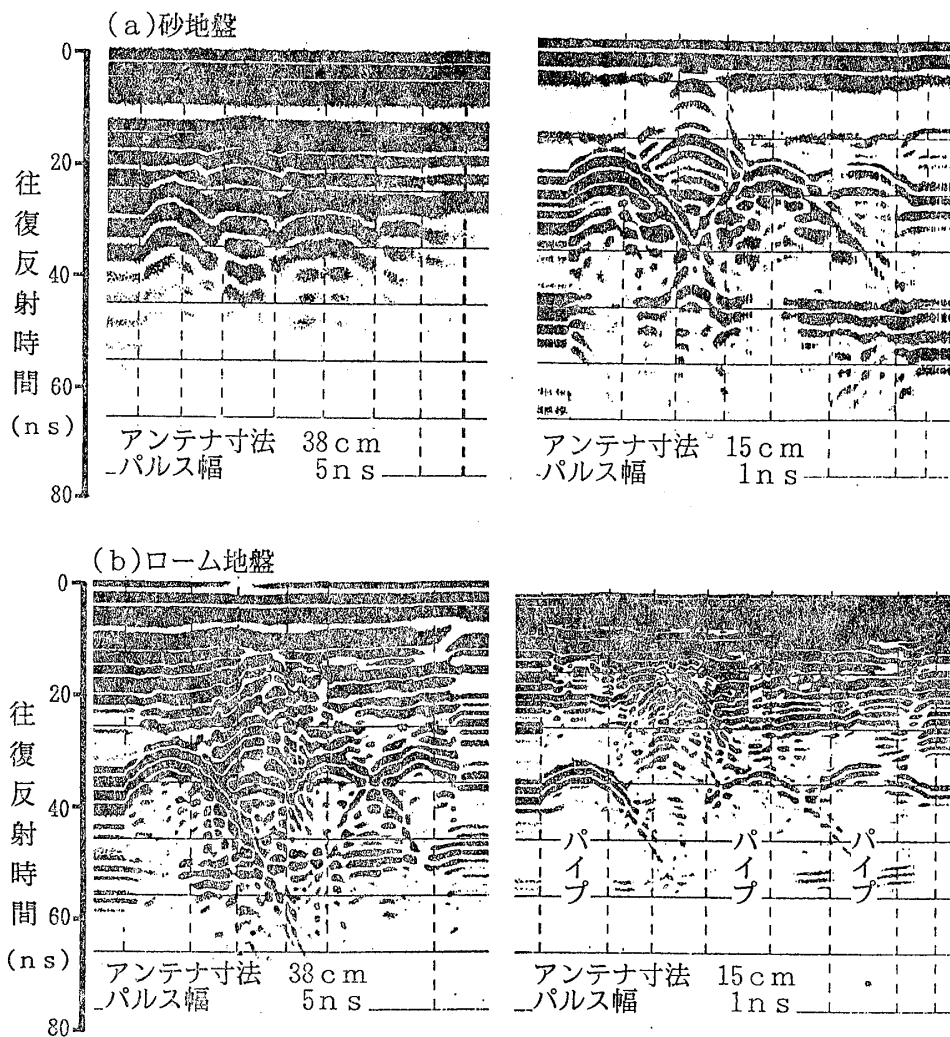
そこで、送信アンテナ寸法と送信パルス幅の違いが探査結果に及ぼす効果（探査性能）を調べるために、つぎのような実験を実施した。

図一七は、砂地盤およびローム地盤の深さ1.5m のところに鋼製のパイプおよび塩化ビニール製のパイプを埋設し、寸法が38cm の送信アンテナに幅5 nsec の送信パルスを入れた場合と、寸法が15cm の送信アンテナに幅1 nsec の送信パルスを入れた場合の探査記録を示す。図の左側にφ300mm の鋼管、中央にφ100mm の鋼管、右側にはφ200mm の塩ビ管が埋設されている。

この実験結果によれば、いずれの地盤においても、送信アンテナ寸法および送信パルス幅が小さいものの方が、埋設パイプからの反射波を分解能よく捉えており、パイプの埋設位置を明瞭に判別することができる。また、送信アンテナ寸法および送信パルス幅が同じであっても、電磁波の伝播速度の小さいローム地盤の方が分解能良くパイプからの反射波を捉えている。たとえば、送信アンテナ寸法が38cm の場合では、ローム地盤内の埋設パイプは判別可能であるが、砂地盤内の埋設パイプは判別が困難である。したがって、地盤の種類によってアンテナ周波数を選択する必要があることが分かる。

さらに、土質地盤中の埋蔵遺跡に対する探査性能を比較するため、数種類の送信アンテナによる探査実験を実施した。

この実験を行った場所は、古墳群の存在が確認されているところで、旧地表の上に軽石層が堆積している。実験の結果は、図一八に示す通りである。図の上段は、寸法が38cm の送信アンテナに幅5 nsec の送信パルスを入れた時の探査記録、中段は、寸法が21cm の送信アンテナに幅2 nsec の送信パルスを入れた時の探査記録、下



図一七 埋設パイプの探索結果

Fig.7 Exploration result of buried piping

段は、寸法が15cmの送信アンテナに幅1nsecの送信パルスを入れた時の探索記録である。これらのアンテナ条件を図一4に対比すると、放射電磁波の周波数は、下段ほど高くなっていることがわかる。

いずれの記録においても、地下からの反射波が捉えられており、反射面の起伏の様子を知ることができる。これらの反射面のうち、最下部の面は、今から1,500年ほど前の地表面(旧地表面)を表している。記録の中央左側において、この地表面が大きく盛り上がっている部分があり、これは、火山の噴火によって軽石層の下に埋没した古墳の墳丘を表している。

図一8の上段に示す放射電磁波の周波数が低い(送信アンテナ寸法38cm,送信パルス幅5nsec)場合の記録においては、全体的な状況の概要を把握することができるとはいえ、反射面を分離することができず、探索としての効果を期待することはできない。

これに対して、中段の記録(送信アンテナ寸法15cm,

送信パルス幅1nsecの場合)と、下段に示す放射電磁波周波数がより高い(送信アンテナ寸法15cm,送信パルス幅1nsec)場合の記録とを比較すると、下段の記録の方が分解能がよく、古墳の形状や地層の堆積状態をより明瞭に捉えていることがわかる。特に、中段の記録では明らかでないが、下段の記録では、旧地表面の上部にもう1つの反射面が明瞭に認められ、旧地表面の上に堆積した軽石層が2層になって堆積していることが読み取れる。

したがって、放射電磁波周波数を高くすることによって、分解能を向上させることはできるが、図一6に示したように、送信アンテナ寸法が小さくなると、電磁波の振幅は小さくなり、地盤中での透過力は低下する。

図一8の中段に示す記録において、“埋葬施設”と記したところに、水平に並んでいる短い4本の反射波が見られる。これは、発掘してみなければわからないが、死者を埋葬するために掘削加工した部分である可能性が強

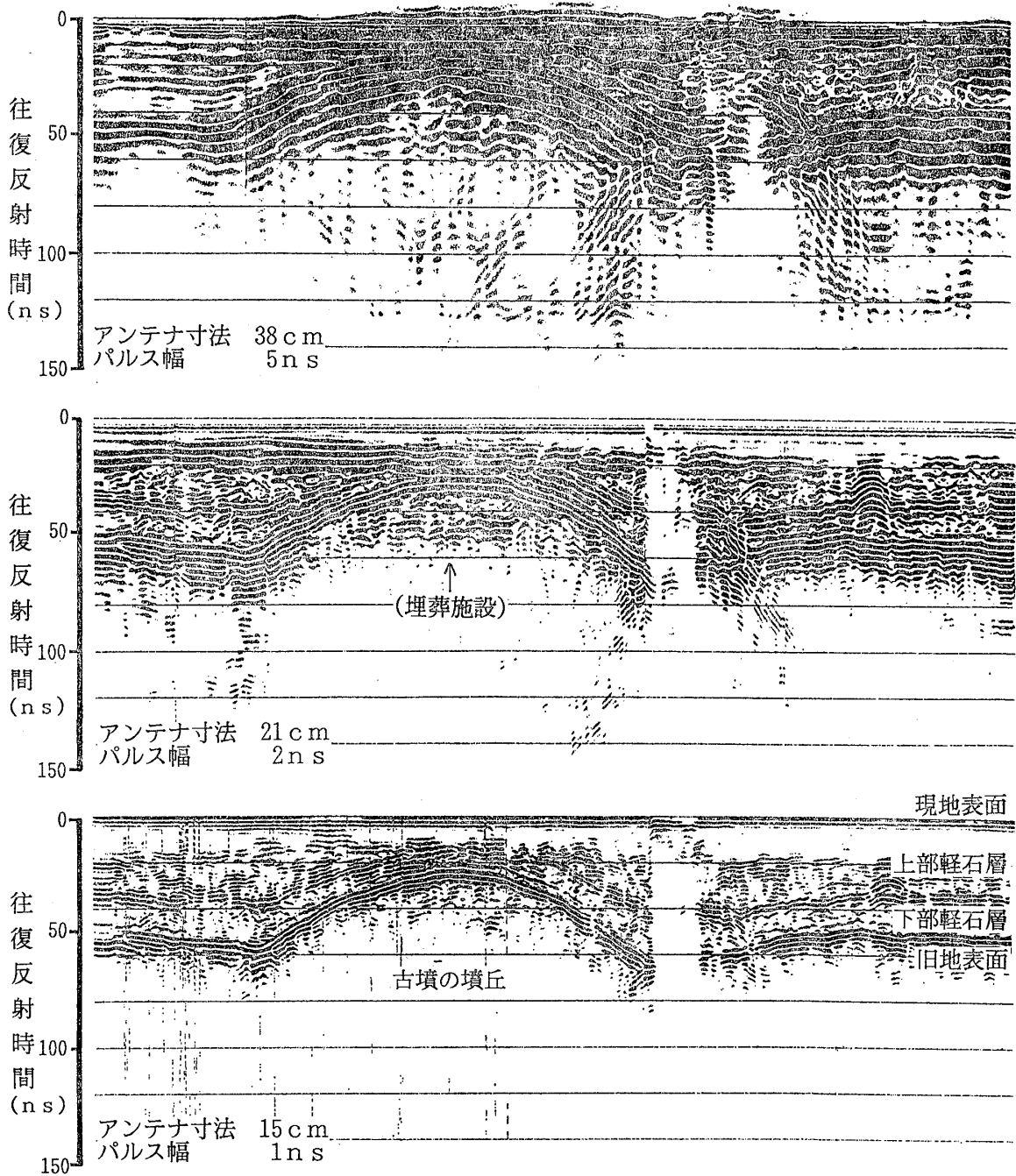


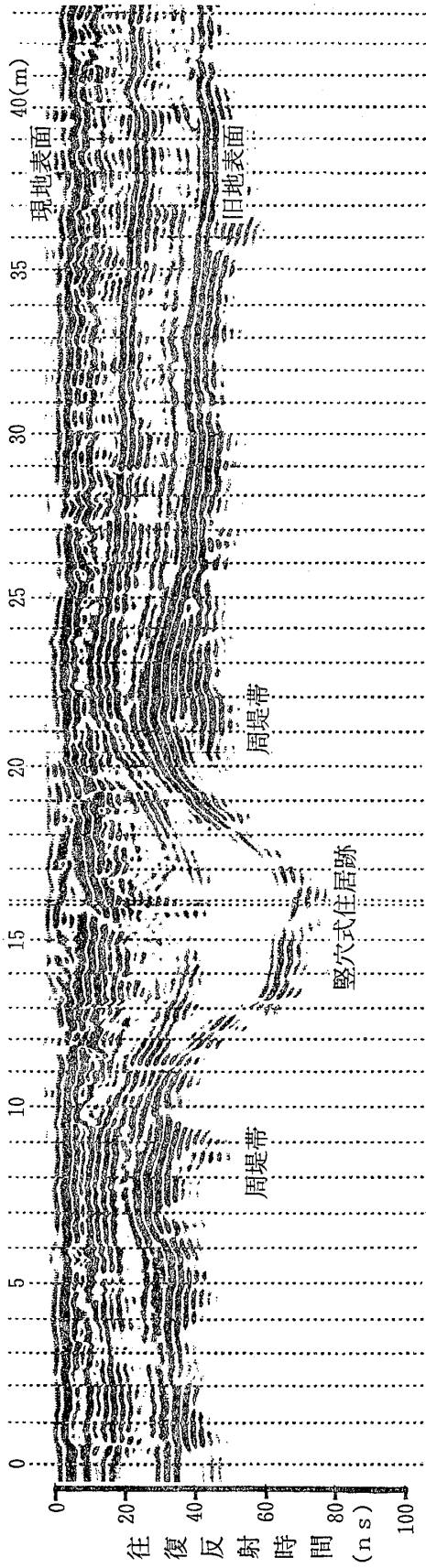
図-8 アンテナの種類による記録の変化  
 Fig.8 Changes in record due to kinds of antennas

い。しかし、下段の記録では、旧地表面下にあるこの部分からの反射波は記録されておらず、したがって、放射電磁波は、この部分まで透過しなかったことになる。

地下レーダ探査においては、放射電磁波の周波数を高くすると、分解能は向上するが電磁波の透過力は小さくなり、周波数を低くすると、透過力は大きくなるが分解能は低下するという事象があるために、使用する送信アンテナの条件をそれらの要求を共に満たすように設定する必要がある。

しかし、探査深度の比較的浅い遺跡を対象とした探査では、放射電磁波の周波数が比較的高い送信アンテナを使用することによって、分解能の面で良好な結果を得られるものと考えられ、一方、探査深度をより深くする必要がある時には、分解能は低くなるけれども、より低い周波数のアンテナを使う必要がある。

### 5 地下レーダによる遺跡探査例



図一9 竪穴式住居跡の地下レーダ記録  
 Fig. 9 Ground-probing radar records of pit dwelling



図一10 水路跡の地下レーダ記録  
 Fig. 10 Ground-probing radar records of ditch



上記のような実験および考察の結果として、遺跡調査に際しては、通常、寸法が21cmの送信アンテナに幅2nsecの送信パルスを入れたものを使用することにし、必要に応じて、他の組合せのものを用いている。

寸法が21cmの送信アンテナと幅2nsecの送信パルスの組合せによる送信アンテナによって実施した遺跡探査の例を示す。この送信アンテナから放射される電磁波の周波数は、地盤によって異なるが、遺跡探査の場合の地盤では、およそ200~250MHzである。

図-9は、軽石層の下に埋没した古墳時代の堅穴式住居跡の地下レーダ記録である。この地域の周辺では、これまでに行われた発掘調査などによって、軽石層の下に一辺の長さが8~12mで、掘り込みの深さが1.5~1.8mの方形の堅穴式住居跡が検出されており、探査を実施した地域においても、上記のような規模の堅穴式住居跡が存在する可能性が考えられた。したがって、地下レーダ記録上に現れている掘り込みの規模や形状を、発掘調査によって確認されている堅穴式住居跡の状況と比較することによって判別したものである。

この記録においては、古墳時代の地表面(旧地表面)と軽石層の中間層からの反射が明瞭に把握されており、堅穴式住居跡による掘り込みとその周囲に巡らされた周堤帯の形状も鮮明に判別できる。さらに、堅穴式住居跡の掘り込みの規模や、周堤帯が旧地表面の上に土を盛り上げて作られていることを読み取ることができる。

図-10は、中世の豪族の居館跡の周囲を廻る水路跡の検出を目的として実施した地下レーダ記録である。この地域では、ローム層の下で、深さがおよそ2.0m付近に砂礫層が分布し、この砂礫層上面が反射面として捉えられている。水路跡はこの砂礫層をも掘り込んでいるために、地下レーダ記録の上では、砂礫層上面の落ち込みのような形となって示されている。現在の地表面からこの水路跡の底面までの深さは、最大でおよそ4.5mに達するものと推定される。この記録は、十分な分解能を保持しながら、比較的深いところまでの地盤の状況が得られたものである。

## 6 まとめ

地下レーダの送信アンテナから地盤中に放射される電磁波の周波数は、主として、送信アンテナの寸法とそれに注入される送信パルス幅によって変化し、また、地盤の種類によっても変化する。

遺跡調査のように土質地盤で浅い深度のところを対象とする探査では、送信アンテナから放射される電磁波の

周波数を可能なかぎり高くし、分解能を上げることが必要であり、探査を実施する当たっては、対象地盤の種類および必要とする探査深度と分解能を十分に考慮して、送信アンテナを選定することが重要となる。

ところで、地下レーダによる調査は、遺跡の発掘調査に取りかかる前の段階の予備調査において有効な手段であり、最近では積極的に利用されるようになってきた。すなわち、この地下レーダによる調査によって、遺構の分布状況を広い範囲にわたって速やかに把握することができるため、発掘調査を計画的に進めることが可能となるからである。

これまでに筆者らが実施してきた調査結果によれば、遺跡を埋蔵している通常地盤においては、送信アンテナから放射される電磁波の周波数を200MHz以上に設定することによって、埋蔵遺跡の状況はかなり明確に把握できることがわかってきた。

しかしながら、一方では、地下レーダの適用上の問題点として、遺跡の埋蔵状態や土質条件によって制約があることである。例えば、粘土地盤が優勢となる沖積低地に立地する遺跡では、地盤中を伝播する電磁波がきわめて減衰しやすいため、探査が困難となる場合が多い。また、小規模な柱穴や土壇などが密集している遺跡や、同じ場所で多種多様な構造物が繰り返して作られている遺跡では、地層状態が複雑であるため、個々の遺構を検出・判別することは困難である。このような状況にある遺跡の探査を実効性のあるものにするためには、現地における探査手法ならびに解析法を検討しながら、試行錯誤的に探査実験をしていく必要があると考える。

## 参考文献

- Annan, A. P. and Davis, J. L. (1976): Impulse radar sounding in permafrost. *Radio Sci.*, Vol.11, pp.383~394.
- 原徹夫, 坂山利彦(1983): 地盤調査に対する地下レーダの適用性について 応用地質調査事務所年報 No.5, pp.77~91.
- Imai, T., Sakayama, T. and Kanemori, T. (1987): Use of ground-probing radar and resistivity surveys for archaeological investigations. *Geophysics*, Vol.52, pp.137~150.
- 木村應志, 坂山利彦, 兼崎幸雄(1992): 電磁波反射法による地中埋設物探査技術について——パルス可変型インパルス地下レーダ装置の開発とその適用結果——物理探査 Vol.44, No.2, pp.81~91.

- 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.
- Sakayama, T., Osada, M. and Nishimura, Y. (1988): Buried condition of archaeological remains in Japan and some examples of site investigations using geophysical methods: Proc. of an International Symp., The engineering geology of ancient works, monuments and historical sites, pp.1071~1077.
- 坂山利彦, 長田正樹, 田村晃一, 石井克巳(1990): 地下レーダによる軽石下の遺構分布調査——群馬県子持村: 黒井峯遺跡, 西組遺跡ほか——考古学と自然科学 No.22, pp.43~57.
- Stwert, S. and Unterberger, R.R. (1976): Seeing through rock salt with radar. Geophysics, Vol.41, pp.123~132.