



第6章 埋設金属や地下水を検出したり、 地中やコンクリート内部などを可視化する

地中レーダ技術と 人道的地雷検知への応用

佐藤 源之
Motoyuki Sato

はじめに

地中レーダ(Ground Penetrating Radar: 以下GPR)は、地中物体からの電波の反射を利用する計測法であり、地中を高速・高精度に可視化できる手法として注目を集めています。電波は埋設された金属物体だけでなく、誘電体(絶縁物)である地層境界面や土壌の水分率分布でも反射するため、地下水や人工的な埋設物の検出も可能です。コンクリートのひび割れ調査など非破壊検査では超音波も利用されていますが、電波は空洞中など超音波が利用できない対象も計測可能であることにも特徴があります。



〈写真1〉 小学校でGPRを利用した授業をしたときのようす

写真1は小学校でGPRを利用した授業をしたときのようすです。GPRは子供でも簡単に操作できます。図1はGPRによって計測した地中の垂直断面図で、深さ約1.5 m付近に埋設されたパイプからの反射波が山なりの双曲線カーブとして明瞭に見えています。長さ17 mにわたって測定しており、所要時間は数分です。GPRの特徴を活かして、パイプやケーブルなど埋設物の検知や路面空洞調査、コンクリート保全調査などに活用されています。

国外では地質調査、氷床、地下水、凍土計測など環境問題への応用例も多く、とくに最近では地雷探査、遺跡探査への利用も盛んに検討されています。

本稿では、GPRの高周波回路のハードウェア構成を中心に説明し、地雷検知を例に具体的な装置と観測データの例を示します。

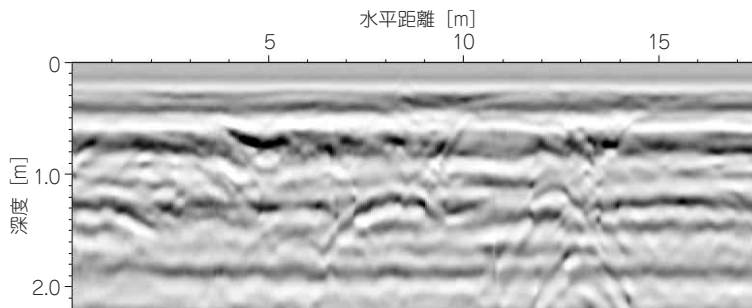
GPR装置の基礎知識

■ 電波は地中を伝わるのか

皆さんは携帯電話がビルの地下で使えなかったり、トンネルの中でラジオが聞こえなくなった経験をお持ちでしょう。空中に比べると、地中では強い減衰を受けますが、それでも電波は地中も伝わります。電波の減衰は媒質の導電率によって生じます。また同じ媒質なら、周波数が低いほど電波の減衰は小さく深くまで伝搬できます。しかし周波数が低いと使用できる周波数帯域が狭まるため分解能は劣化し、小さな物体を検

〈図1〉

GPRによる地下の可視化例(上に凸の放物線状の波形から、深度1 m付近に何本かの埋設管があるらしいことがわかる)



知するのには適しません。

物質の電気的性質は、誘電率、導電率、透磁率で表されますが、GPRの周波数帯域では誘電率が最も重要な役割を果たします。金属パイプのような導体からも電波は強く反射されますが、人工物以外に大きな反射を生じる導電性物質は、自然界にはほとんど存在しません。誘電率は含水率によって大きく変化するため、GPRは水を含む物体の検知に適しています。

■ レーダ・システムの基本的な構成

地中レーダの基本的なシステム構成を図2に示します。送信機が発生する送信信号はアンテナから地中へ放射され、周囲の媒質と電気的性質の異なる媒質によって反射や散乱を受けます。受信アンテナで受信された信号は、信号処理を行って表示・記録されます。これはどんな形式の地中レーダにも共通しています。

■ レンジ分解能

図3を見てください。反射波に二つの反射体が含まれているとき、それを分離識別できる最小距離を「レンジ分解能」(距離分解能)と呼びます。二つの反射体の距離を ΔR m、レーダ・パルス幅を τ sとすると、

$$\frac{2 \Delta R}{v} = \tau \quad \dots\dots\dots (1)$$

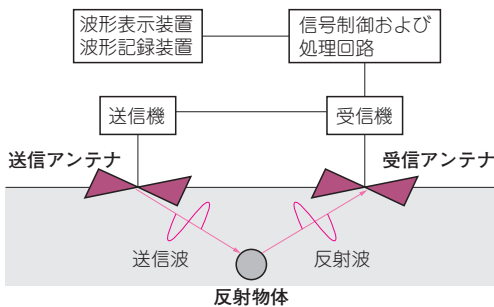
であれば、二つの物体からの反射波は分離するので、

$$\Delta R = \frac{\tau v}{2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

がレンジ分解能になります。ただし v m/sは電磁波の速度です。周波数 f_0 Hzで変調されたパルス幅 τ の変調パルス波形のスペクトルは共振周波数 $\pm f_0$ を中心として図4のように帯域幅 $B = 1/\tau$ Hzの広がりをもつので、レンジ分解能は、

$$\Delta R = \frac{v}{2B} \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表せます。レンジ分解能は周波数帯域幅で決まるのであり、単に周波数で決まるものではありません。



〈図2〉 地中レーダ・システムの基本構成

■ アジマス分解能

● 大きな開口長をもつアンテナほど分解能が高い

図5を見てください。空港で目にする航空管制用のレーダ・アンテナは、回転しています。アンテナから送信される電波の指向性(半値)幅 $\theta_{1/2}$ radは、

$$\theta_{1/2} \approx \frac{\lambda}{2D} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 D :アンテナの長さ(開口長)[m]、 λ :送信波の波長[m]

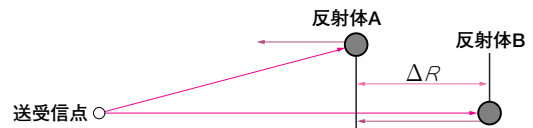
と近似できます。つまり波長に比べ十分大きな開口長を持つアンテナは鋭い指向性をもつため、送信アンテナの電波ビームの中にある航空機からの反射時間を測れば、アンテナの向きと、アンテナからの距離により、航空機の位置を計測できます。送信電波が進むのと直行する方向で二つの物体を識別できる最小距離を「アジマス分解能」(方位分解能)と呼びます。

大きな開口長 D を持つアンテナほど指向性幅 $\theta_{1/2}$ は小さくなりますから、高いアジマス分解能を実現できます。しかし通常のGPRは波長50 cm(空中で600 MHz)程度を使用するため、十分鋭い指向性を実現するためには全長5 mものアンテナが必要となり、実用的ではありません。そこで別の技術が必要になります。

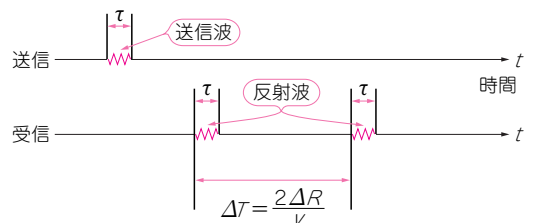
● アジマス分解能を高める合成開口レーダ技術

レーダ・アンテナを1か所に停めたままでは一つの波形しか計測できませんが、アンテナを移動しながら連続的に計測すれば、レーダ・アンテナと物体までの距離が変化し、それに対応する電波の往復時間から、反射物体の位置や形状を計測できます。

地中の反射物が水平な地下水面や、わずかに傾いた地層境界面などであれば、反射の往復時間の変化は、反射体の形状と一致しますが、反射体が波長より小さな物体であるとき、反射信号は回折効果によって、反



(a) 送受信点と二つの反射体



(b) 時間軸上の信号

〈図3〉 レンジ分解能の説明