



地中レーダの原理・特徴と 適切に活用するための留意点

千賀 敦夫

地中レーダは地中の構造物の様子や地層の状態を知るための非破壊検査手法として利用されている。地中の断面像や平面像を得ることで対象物の位置・深度を知ることができる。しかしながら、これを適切かつ有効に活用するためにはその特徴を理解し運用に当たって留意すべき点も多い。本記事では、地中レーダ装置の基本原理と方式による技術的な特徴を解説し、実際の探査利用における留意点などを紹介する。
キーワード：地中レーダ，地下探査技術，インフラ維持管理，路面下空洞，土壌誘電率推定

1. 地中レーダとは

地中レーダは非破壊探査および地下探査手法の一つであり、主に地中の埋設物構造や地層の状況を非破壊で調査する手法として用いられている。コンクリート構造物の内部鉄筋構造を探査するコンクリートレーダも同種である。地中レーダの他にも地下探査技術は複数存在し、主なもので次のような特徴がある(表1)。この中で、地中レーダには大きな特徴が二つある。一つは原理的に埋設物の材質・形状に依らず検出できること、もう一つは地表から埋設物までの距離(深度)が分かることである。

表1 地下探査技術の例

地下探査手法	対象物	特徴
電磁誘導法	金属物(連続しているもの)に限る	埋設管等の経路追跡が効率的
地中レーダ法	金属/非金属物, 空洞	埋設物の深度推定が可能
金属探知機法	金属物に限る	装置が安価で操作容易

地中レーダは地上を移動しながら送信アンテナから地中に向けて電磁波を放射する。放射された電磁波は地中の構造物や空洞などの境界面(土や砂などの媒質と誘電率が異なる物体の面)で反射し、反射された電磁波は地表面まで届く。この反射された電磁波(反射波)を受信アンテナで受けることで、埋設物の位置や深さなどを探査する。探査画像は、受信した信号の強さを反射波が戻ってくるまでの時間とレーダの移動位置ごとに表したものである(図1)。

埋設物までの深さ d は地中を進む電磁波の速度 v と反射往復時間 t で $d = vt/2 = \sqrt{\epsilon_r} \cdot ct/2$ と表せる。ここで c は真空中の光速、 ϵ_r は土壌媒質の比誘電率であり、埋設物までの深さを求めるには土壌の比誘電率を知る必要があるということが重要になってくる。探査画像の時間軸は距離(深度)に読み替えることができるので、探査画像はレーダが移動した軌跡の断面画像に近い。複数の断面データを集約した深度平面画像や、トモグラフィ処理した3D画像を表示するシス

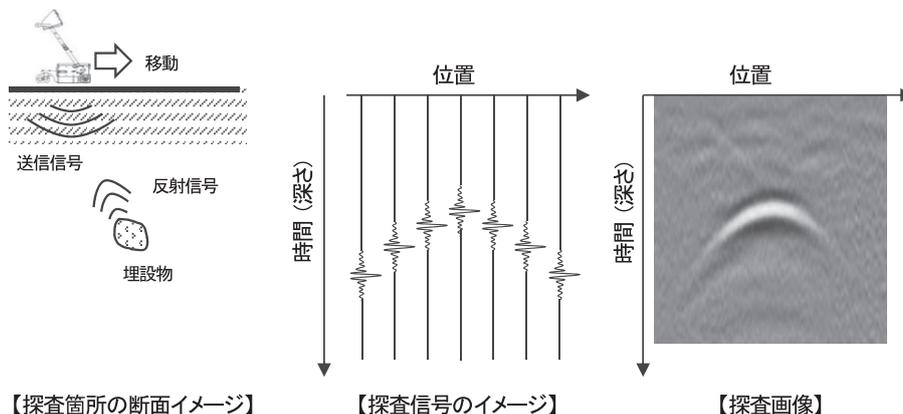


図1 地中レーダ探査の基本イメージ

テムの利用が広がっており、特に道路下探査の分野に多い。

2. 地中レーダの方式と周波数による特徴

地中レーダの方式は放射する送信信号の形式によって、大きく「パルス式」と「連続波式」に分類される。

パルス方式で用いる送信信号はインパルスもしくはモノパルス波形である。送信部から放射したレーダ信号の反射波を時間軸で直接観測することで探査信号を得る。受信構成は一般的には「サンプリング」と呼ばれる方式を用いており、比較的単純な回路構成で実現できることが特徴である。連続波方式は変調された連続的な波形を送信する。チャープ方式やステップCW方式といったものがあり、送信信号の総エネルギーを大きくし易いことが特徴である。受信構成において「パルス圧縮」と呼ばれる処理を加えることで探査信号を得る。パルス式／連続波式のいずれの方式を用いた場合においても、最終的にユーザが扱う探査信号は埋設物による反射位置（時間）にピーク振幅が現れるパルス状の信号であり、基本的な取り扱いに差異はないと言える（図-2）。

利用シーンに応じて地中レーダを選択する場合、その探査性能選択は使用する周波数帯域に依るところが大きい。探査性能は主に「分解能」と「探査可能深度」の二つの指標で評価される。

①「分解能」は“どれだけ細かく埋設物の位置や形状を認識できるか”を表す指標である。例えば、複数の埋設物が近接して設置されている箇所それぞれを位置を詳細に特定する場合などに重視する。これは探査信号のパルス幅によって決まり、周波数帯域幅とおおよそ反比例の関係にある。また移動方向の分解能には送受信アンテナ間の距離も影響しこれにはアンテナの小型化が要求される。つまり、より細かく埋設物の形状や位置を探査するためには中心周波数が高く、帯域幅も広いレーダが必要になる。特に分解能性能が要求される鉄筋探査用のコンクリートレーダの中心周波数は近年高周波化が進み、2GHz超を利用するものが一般化している。

②「探査可能深度」は“どれだけ深いところの埋設物を検出できるか”を表す。送信出力や受信感度といった一般的な性能の他に、アンテナの中心周波数が大きく影響するという点が地中レーダの特徴の一つでもある。これは電磁波が土壌を伝搬する際の減衰率が周波数に強く依存しており、低い周波数ほど地中の深いところまで届きやすいということによる。そのためより深い探査可能深度を得るためには低い周波数をいかに効率よく送受信するかが重要になる。一般的に低い周波数の効率には外形の大きなアンテナが必要であり、大深度用の地中レーダは大型にならざるを得ない。

主な探査対象と一般的な対象深さおよびレーダ周波

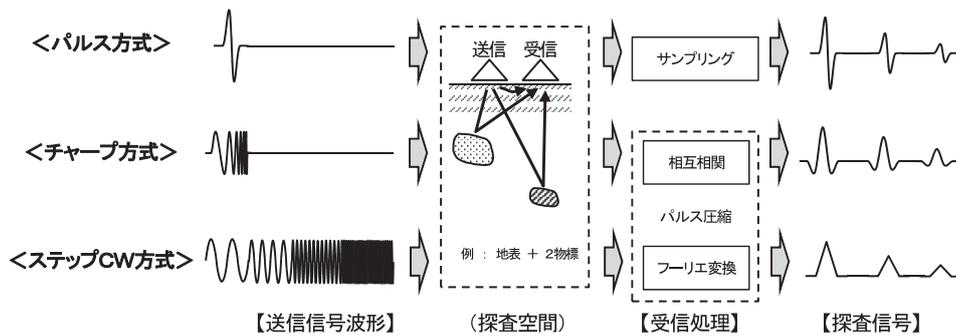


図-2 レーダの代表的な方式

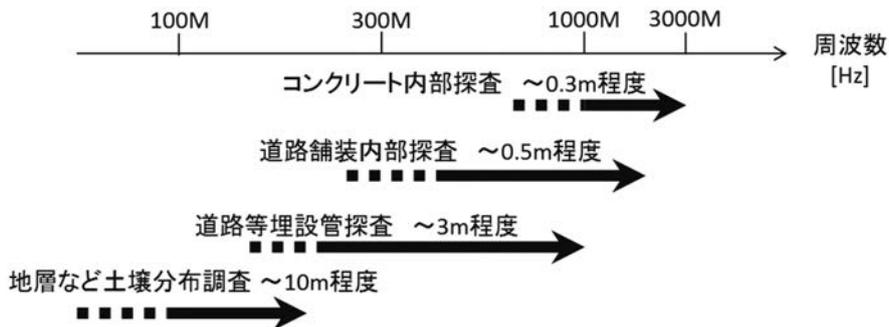


図-3 探査対象とレーダの周波数

数の目安を図-3に示す¹⁾。近年は、アンテナの周波数共用技術とレーダ信号源の高度化技術をもとに、複数の周波数帯を併用した機器も増えてきている。特に埋設物探査の分野では深度と分解能のバランスが得やすい300 MHz周辺と800 MHz周辺を併用するものが多い。

3. 地中レーダ探査の実際

(1) 探査事例

(a) 鉄筋コンクリート舗装下の例

埋設管探査において鉄筋コンクリート舗装の下を探索するには、鉄筋間隔を認識できる分解能とその下まで探査が可能な周波数を適切に選択することが必要である。800 MHzのレーダ(写真-1右)を用いて300 mmと200 mm間隔の鉄筋下の埋設管を検出した例を示す(図-4)。

(b) 路面下空洞探査

東日本大震災以降の交通インフラ維持のニーズの高まりを受け、路面下空洞の探査事業が増加している。路面下空洞探査は、車両搭載型レーダを用いて通常と同程度の速度で走行しながら広範囲を探索し空洞の箇所を発見する一次調査と、空洞の深度・面積等を明確化する二次調査に分かれる。路面下空洞探査(二次調査)の例を示す(図-5)。

(2) 地中レーダの利用における現状の留意点

(a) 埋設物深度の推定精度

上述の通り、地中レーダは地表から埋設物までの距離



写真-1 埋設物探査用レーダの例

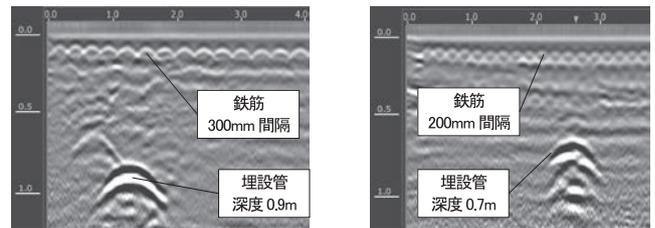


図-4 埋設管探査の例

離を反射信号の時間を観測することにより求めるので、時間から距離への変換に用いる「比誘電率」の値を正確に推定することがその精度を決める。表-2に一般的な土壌物質の比誘電率の値を示す。これを見てわかるとおり土壌の比誘電率には大きな開きがあり、例えば「乾燥した砂質」と「湿ったローム質」では5倍近くの差異がある。つまり土壌媒質の判断を間違えると、実際の埋設物の深度と算出結果とは2倍以上も異なるということを意味する。舗装下探査など土壌が不

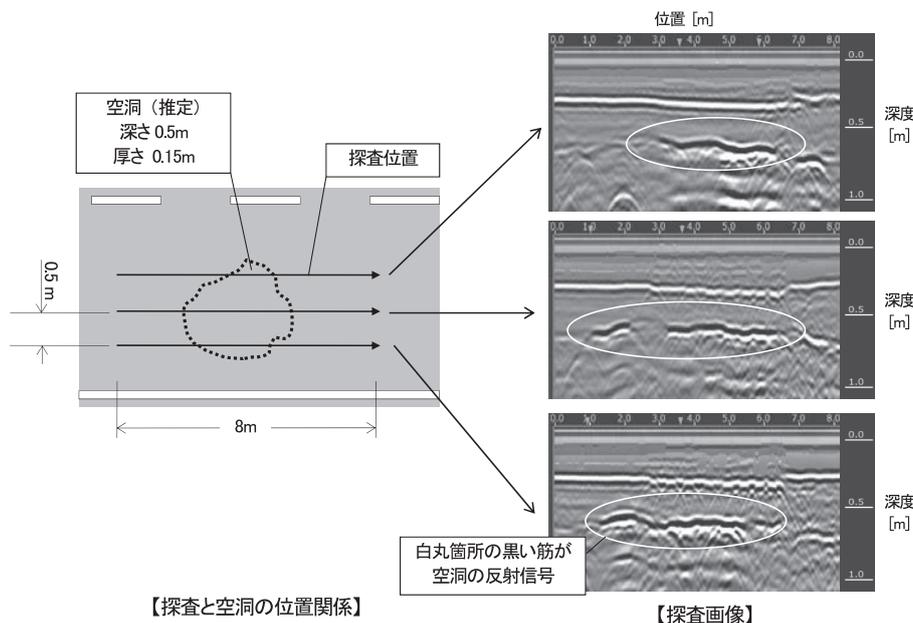


図-5 路面下空洞探査の例

表一 2 代表的な物質の比誘電率 (100 MHz) (Daniels, 1996)

媒質	比誘電率 ϵ_r		
	乾燥状態	湿潤状態	
空気	1		
アスファルト	2 ~ 4	6 ~ 12	
コンクリート	4 ~ 10	10 ~ 20	
土壌	砂質	4 ~ 6	15 ~ 30
	ローム質	4 ~ 6	10 ~ 20
	粘土質	4 ~ 6	10 ~ 15

明な場合に算出した深度推定値の取扱いには十分に注意する必要がある。

この深度推定の難しさと不確かさが、地中レーダが一般に利用されることを妨げる要因の一つとなっており、解決が求められている。具体的に比誘電率を推定する方法として実用されているものとしては、(a) 埋設管反射信号の双曲線形状をもとにした信号・画像処理による推定²⁾、(b) ワイドレンジ法などといったアンテナ走査手法による算定³⁾、(c) 電磁誘導法や既知の埋設管深度による補正 などがある。また特にコンクリート鉄筋探査の分野に限れば、「鉄筋被り厚の推定法」としてその手法や指標が確立しており、おおよそ5%程度の推定性能が得られるとされている⁴⁾。

(b) データの解析と判定処理

従来、探査データの解析には専門的なスキルと時間が必要であった。しかし近年の埋設物探査は現場で即座に解析・判断すること、更にはそれに専門的なスキルを要さないことが求められている。このための機能として、探査データの中から埋設物の反射信号を抽出し、位置・深度を判定する処理を自動化したものが実用化されてきている(図一6)。但し現状では、信号形状に比較的特徴のある横断埋設管の検出に限ったものが多く、今後は多様な埋設物の判定に広がることが求められている。

また、地中レーダの探査性能は検出対象となる埋設物の形状・材質だけでなく、土壤媒質の種類・状態、さらには外部からの雑音の影響も受け、その変動の幅も大きい。こういったことから、特に「埋設物は存在しない」という判断には極めて慎重を要する。このような判断をサポートするために、信号振幅の減衰傾向と雑音振幅などを総合的に評価し、検出限界ライン(探度)を明示する機能を持つものもある⁵⁾。

4. おわりに

地中レーダの基本的原理と特徴、および利用における留意点について紹介した。地中レーダはその性能発揮、および精度の確保をユーザのスキルに依存する部分がまだ多いが、それをサポートし簡略化する処理技術も着実に進んでいる。機器とユーザの両面での技術向上が進むことで、活用の領域が今後さらに広がることを望む。

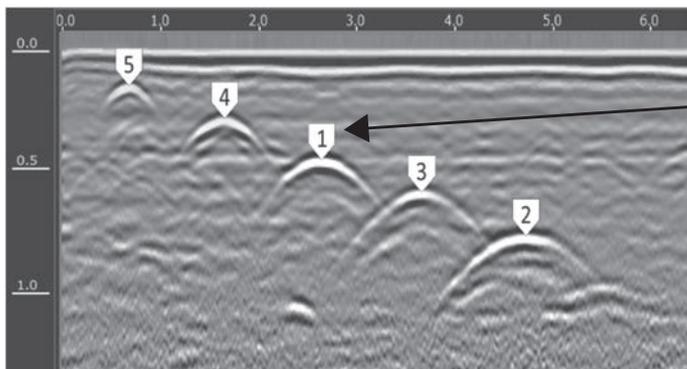
JCMA

《参考文献》

- 1) 「非開削地下探査技術 適用の手引き」, (株)日本非開削技術協会, 2016年3月
- 2) 「物理探査ハンドブック(手法編)」, (株)物理探査学会, 1998年
- 3) 「大阪ガスの埋設物探査技術」, No-dig today (49), 18-21, (株)日本非開削技術協会, 2004年10月
- 4) 「電磁波レーダ法によるコンクリート構造物中の鉄筋探査方法」, (株)日本非破壊検査協会, 2011年 他
- 5) 「地中レーダの探査可能深度の自動判定」, 電子情報通信学会総合大会講演論文集 1997年, 通信 (1), 221, 1997年3月

[筆者紹介]

千賀 敦夫 (せんが あつお)
日本信号㈱



数字マーカーの箇所が埋設管の推定位置 (数字は確からしさの順位)

5本の埋設管が階段状に埋まっている箇所を探査した画像

図一 6 埋設物の自動検出処理の例