

「地球環境計測」

東北大学東北アジア研究センター 佐藤 源之 sato@cneas.tohoku.ac.jp

<http://cobalt.cneas.tohoku.ac.jp/users/sato/index-j.html>

1 はじめに

地球温暖化により地球規模で森林が減少し砂漠化が進んでいるという。自分の家の前の森が枯れたとしたら森林の破壊を感じるかもしれないが、一方では他の場所で新しい木が生長し森林は増えているかもしれないと思う。本当に森林は減少しているのだろうか。こんな素朴な疑問に答えるのが地球環境計測技術である。地球環境計測の方法や目的は多種多様であるが、人間が直接見ることができないような場合に光や電波を利用して離れた場所からの測定が有効である。

衛星リモートセンシング技術はこうした目的に使われる良く知られた手法である。地球を周回する衛星に搭載したセンサやカメラで地球の様子を観測し、森林の面積を測れば森林面積の変化を知ることができる。衛星は赤外線、可視光線、電波などを利用して地上数百 km の軌道から地球表面を計測している。一方、地球環境は地下水の枯渇、土壌汚染など地下においても重要な問題である。人間は地下を直接目で見ることはできない。井戸を掘るなどして初めて地下の様子を知ることができる。掘らずに地下の様子を知ることができれば地下水脈の発見、土壌汚染の拡大防止など利用価値が高い。こうした地下の可視化を可能にするのが地中レーダ技術である。

衛星リモートセンシング技術は 1980 年代より実用化が急速に進み、森林破壊や海洋油汚染のモニタリングなど広域を迅速に計測する必要がある対象また、農耕地分布の把握、農作物収穫予測、森林バイオマス推定、積雪量、河川・湖沼流域面積など広域の情報を数量化する必要がある対象、更に火山・地震活動による地殻変動など直接現地では測定不能な量の計測などに広く応用されている。

電波は地中を透過することができる。電波を利用した地下計測は地下水、地下資源探査、土壌汚染の監視など、人間の目では見えない地下環境を可視化する技術である。リモートセンシングの本来の意味はリモート（遠隔）センシング（測定）であり、地下計測もリモートセンシングの一種であり、衛星リモートセンシングとも共通する技術が多く利用されている。

本稿では、地中レーダを例にとりあげ、電波を利用した計測の仕組みと特徴を説明した上で実際の地球環境計測への応用を解説する。

2 地中レーダ

2.1 地中の電波伝搬と反射

地中レーダ(Ground Penetrating Radar : GPR と呼ばれる)は 1980 年代から研究開発と実用化が進められた地下計測技術である⁽¹⁾。地中レーダは短いパルス状の電波を地表に置かれた送信アンテナから地中に放射し、受信アンテナで受信する。送信電波は地中を伝搬し地層境界面などによって反射され、受信アンテナが捉えた反射波を記録し表示する。図 1 に地中レーダ装置の一例を示す。測定者はレーダ制御装置を背負い、PC 画面を見ながら地



図 1 地中レーダによる地下探査

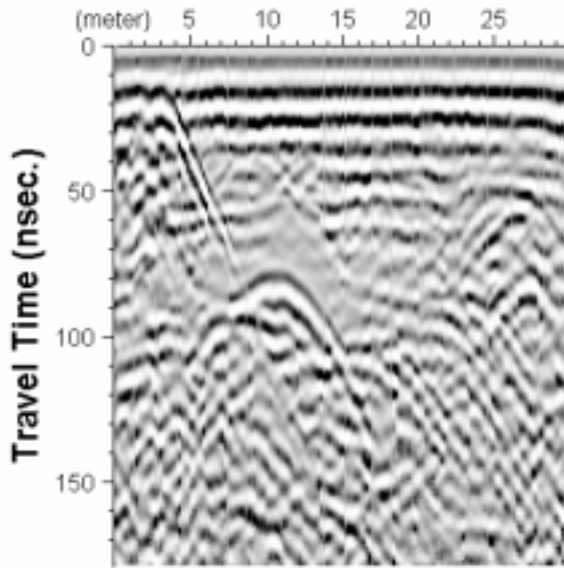


図2 地中レーダプロフィール

換算できる。

$$d = \frac{v\tau}{2} (m) \quad (1)$$

図2では左端に時間軸、右端に速度を $v = 13.8 \text{ cm/ns}$ とした深度を示している。

電波は空気中をよく伝搬するが、絶縁性の物質中も同様に伝搬することができる。物質が比誘電率 ϵ_r であるとき、電波速度は

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} (m/s) \quad (2)$$

で与えられる⁽²⁾。ただし $c = 3 \times 10^8$ は真空中の光速である。図2では現地で測定した $\epsilon_r = 4.7$ を用いた。土や岩石など地中物質の比誘電率は1より大きいので地中の電波速度は空中より遅い。また周波数 f (Hz)の電波に対する波長 λ (m)は

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} (m) \quad (3)$$

であり、空中より同一周波数であれば波長は短い。

電波が地中から反射するのは地中に不均質な物質が存在することによる。図3に地層境界面のように上下層で比誘電率

上の送受信アンテナユニットを移動して測定する。通常の歩行速度で連続的に測定が可能である。

図2に地中レーダで測定したレーダプロフィール(断面図)を示す。横軸が地中レーダの測定位置、縦軸が反射往復時間 τ (s)である。10cm 移動するごとに1波形を測定し、波形を並べて濃淡表示することで擬似的な2次元垂直断面図が得られる。本レーダプロフィールはモンゴルの草原地帯で取得され、人工埋設物は存在しない。地下約5mにほぼ水平に地下水面が見られる。同時に深度10m程度まで地層の起伏に対応する反射波が捉えられている。本図は水平方向30m区間について地下断面を表しているが測定時間は5分程度である。

地中の電波速度 v が既知であれば、レーダプロフィールの反射往復時間 τ (s)から次式で反射体の深度 d (m)に

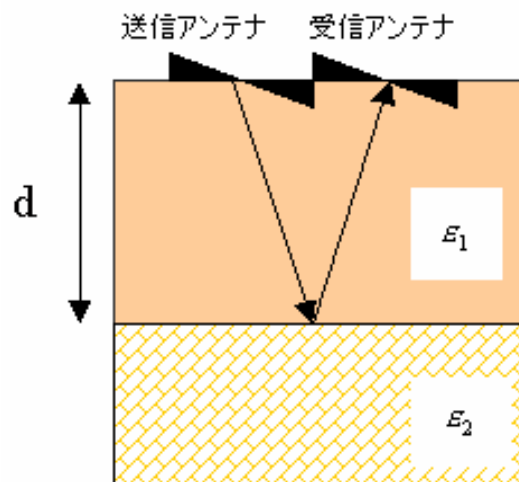


図3 地層境界面からの電磁波反射モデル

の異なる2層媒質構造を示す。このとき上層から入射する振幅1の電波は境界面で反射を受け、振幅 Γ の反射波が発生する。 Γ は反射係数であり無限に広い水平2層構造の境界面では次式で与えられる⁽²⁾。

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (4)$$

(4)式は2層媒質の比誘電率の相対的な比率が反射係数を決めることを示し、反射係数は $-1 \leq \Gamma \leq 1$ の範囲に存在する。これに対し下層媒質が導体である場合、反射係数は

$$\Gamma = -1 \quad (5)$$

となり、誘電体より大きな反射が起きる。従って金属製パイプやケーブルの地中レーダによる検出が容易となる。

実際の地中レーダでは無限に広い金属板や地層境界面ではなく、有限の大きさをもつ物体からの反射を計測するので、(4)(5)式は直接適用できないが、物質の誘電率や導電率に対する反射の大きさを知る目安として利用できる。

2.2 岩石・地層の電氣的性質

土壌、岩石など代表的な地球構成物質の導電率、誘電率を表1にまとめる⁽¹⁾。乾燥状態と湿潤状態での代表値を示すが、乾燥状態ではどの物質も2-3程度の比誘電率であるが、湿潤状態では値が大きく変化する。つまり地層に含まれる水分率が誘電率を定める大きな要因となる。図4に典型的な土壌の水分率と比誘電率の関係を示す⁽³⁾。これと(4)式から、土壌の水分率が変化する位置を地中レーダは検知することがわかる。

表1 地中物質の導電率と比誘電率 (@100MHz) (Daniels, 1996)

媒質	導電率 (S/m)		比誘電率	
	乾燥状態	湿潤状態	乾燥状態	湿潤状態
空気	0		1	
真水	$10^{-4} - 10^{-2}$		81	
海水	4		81	
粘土	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^{-1} - 1$	2-6	15-40
花崗岩	$10^{-8} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-2}$	5	7
土壌(砂質)	$10^{-4} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^{-1}$	4-6	15-30
土壌(ローム)	$10^{-4} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10^{-1}$	4-6	10-20
土壌(粘土質)	$10^{-4} - 10^{-1}$	$10^{-1} - 1$	4-6	10-15

土壌水分率の変化原因として、同一地層で水分率が異なる場合と異なる地層が異なる水分率を有する場合が想定できる。前者は地下水検知、地下水浸透状況やグラウチングモニタなどに利用される。更に同一の土壌であっても圧密を受けた部分と受けない部分では水分率の変化が現れる。例えば遺跡調査などによって古墳などの構造物や建物床面跡などが検出されるのはこうした理由による。また岩石や礫は土壌に比べ水分率が極端に小さく、遺跡調査などで礎石がよく検出できる。

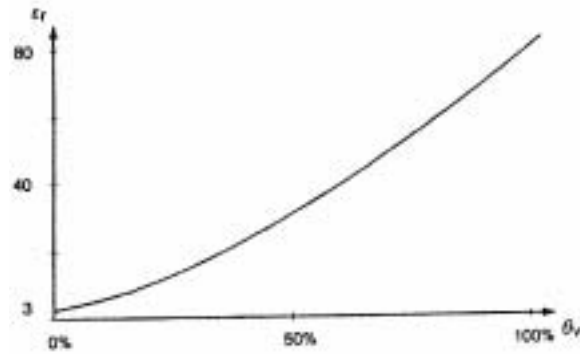


図4 土壌水分率と比誘電率

2.3 レーダ計測周波数の選択

電波は空気など絶縁性物質(誘電体)中では減衰しないが、導電性物質中で強い減衰を受ける。また電磁波の減衰は周波数が高くなるほど大きい。地中の水分は導電性であるため水分率が高い地中で電波は減衰する。従って同一地層でも高い周波数を使用するとレーダ探査深度は低下する。

一方2つの離れた位置にある反射物体をレーダ反射から識別する能力がレーダ分解能である。図2では上下に1m程度離れた地層を識別できるのでレーダ分解能はおよそ1mである。波長が長いと、お互いの波形は互いに重なり合うため識別不能となるからレーダ分解能は波長で決まる。レーダの性能を支配するパラメータをまとめると以下ようになる。

周波数	低い	-	高い
波長	長い	-	短い
減衰量	小さい	-	大きい
レーダ分解能	低い	-	高い
探査深度	大きい	-	小さい

分解能と探査距離は周波数に対して相反するため、周波数の選択は計測の特性を支配するもっとも重要な要因である。石油探査や地質調査では数 kHz 以下の電波を利用して数 km 以上の深さの探査を行うことがあるが、波長が長いので数十 m 以上の厚みを持つ地層など大きな物体しか識別できない⁽²⁾。地中レーダでは 1m 以下の大きさの物体を計測対象とすることが多く、周波数は 100MHz から数 GHz が利用されている。通常地表付近の地質で、この周波数における探査深度は 10 m 以下である。

2.4 地中レーダ装置

地中レーダは国内数社の他、米国、カナダ、イギリス、スウェーデンなどのメーカーによる製品が広く利用されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。市販されている地中レーダ装置は目的に応じて使用周波数が選択されている。多くの地中レーダシステムは無変調パルスを送信するインパルスレーダ方式を採用している。送信電波は送信アンテナの共振周波数を中心として広帯域なスペクトルをもつが、中心周波数を公称周波数としている。地中レーダでは地質、地下水調査などでは 300MHz 以

下、埋設管検知では 500MHz 付近、コンクリート調査などでは 1GHz 以上の周波数が利用される。

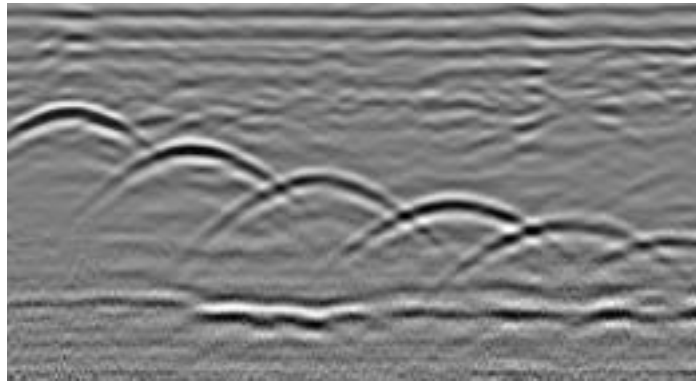
地下計測には弾性波（地震波）を利用する方法が知られているが、電波は弾性波と異なり物質、空气中を問わず伝搬できる。弾性波計測ではセンサである地震計を地中に埋設する必要があるのに対し、地中レーダでは送受信アンテナを地面に接触しないで計測が可能であるから、遙かに高速な測定が行える。地中レーダは測定者が歩きながら測定する他に非接触測定の特徴を活かし自動車や航空機に搭載した広域測定も実用化されている。

2 地中レーダの応用

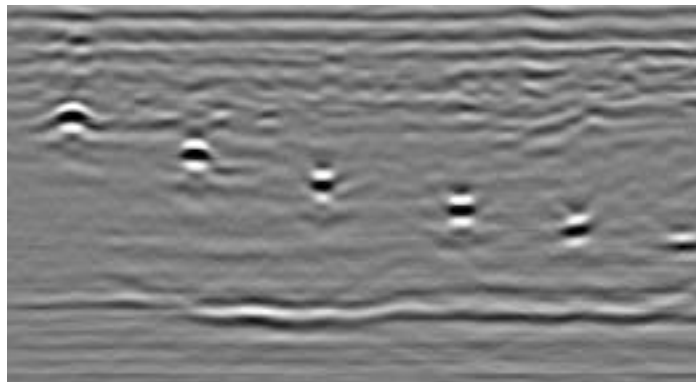
2.1 ライフライン検知

地中レーダが最も広く利用されているのは、ガス管や電話線など人工地中埋設物の検知である。例えば道路掘削工事でライフラインの破損を防ぐため、事前に埋設物位置の計測が望まれている。人工埋設物は舗装道路に 1m 以内の深度に敷設されていることが多いので、地中レーダによる検知技術が早くから実用化されてきた。

図 5 (a)に金属埋設管からのレーダ波形を示す。6本の埋設管とその下の水平な地層境界面が確認できる。金属パイプは電磁波をあらゆる方向に散乱するから反射波は双曲線状に現れ、実際の物体形状とレーダ波形が異なっている。地中レーダで航空管制レーダのようにアンテナからビームを絞って電波を送信しようとする、アンテナの大きさが数 m 以上の巨大なものとなる。従って実用的な地中レーダでは波形の広がり避けられない。熟練者はレーダ波形から実際の反射物体形状を推定できるが、複雑な形状では判断が難しい。そこで地中レーダ波形から実際の物体形状を推定する信号処理法が開発されている。図 5(b)にこうした処理の一種であるマイグレーションによって得られた再構成画像を示す。埋設管の位置と形状が正しく認識できる。マイグレーション処理は衛星リモートセンシングでも利用される合成開口処理の一種であり、今後信号処理の発展が望まれる分野でもある⁽⁶⁾。



(a) レーダプロファイル



(b)マイグレーションによる再構成イメージ

図 5 地中レーダによる埋設管の検出
(大阪ガス 早川秀樹氏提供)

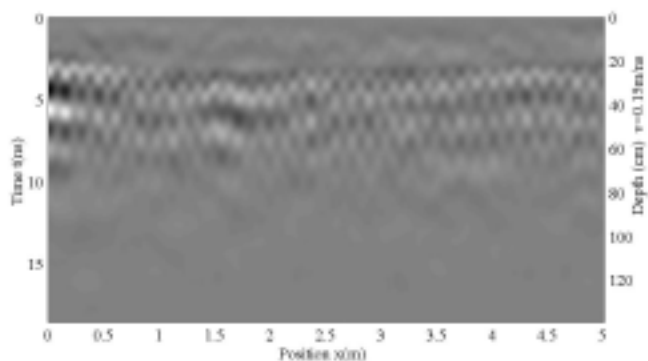


図 6 コンクリート床面の地中レーダプロファイル

2.2 コンクリート調査

コンクリートは均質で水分も少ないため電磁波透過率が良い。コンクリート内部の空洞や、割れ目、また鉄筋の錆などコンクリート構造物の非破壊検査に地中レーダが使用されている⁽⁷⁾。コンクリートは水分が少ないから 1.5GHz 程度までの高い周波数が使用できる。図 6 にコンクリート床面で測定した地中レーダプロファイルを示す。表面から 20cm 程度のところに 10cm 間隔で鉄筋が入っていることがわかる。また鉄筋の位置がすべて同じ深度でないのは、鉄筋の深さが異なるか鉄筋周囲のコンクリートの性質が異なるため、伝搬速度が変化していることを示している。コンクリートにひびが入り水が進入すると、誘電率の大きなコントラストが発生するので異常が検知できる。同様に地中レーダにより舗装道路表面や、トンネル壁面を測定することでコンクリート内部の空洞やひび割れ、また舗装下の空洞を検知する技術が開発されている。このような空洞・ひび割れ調査には超音波が用いられてきたが、電波が空気中も伝搬することから、空洞・ひび割れを透過する電波を利用した非破壊検査技術開発が期待されている。

2.3 地下水・断層調査

地下水調査は地下水源探査や建造物保全に重要である。地下水は試掘によって状態が変化するため、非開削計測技術が望まれている。地中レーダは非掘削計測である上、水分率の変化に敏感であるから地下水計測に適している⁽⁸⁾。

通常地下水の生産能力は井戸からの揚水量と水位を評価するポンピングテストによって行われるが、井戸周辺に広がる帯水層に供給される地下水量、帯水層内の透水性など面的に広がる地下水理的な要因がより重要である。ポンピングテストでは帯水層内部での地下水状態を知ることができないため、評価能力に限界がある。

図 7 は、地下水を取水する地点において取水ポンプ稼働している時と停止時に地中レーダで井戸周辺の測定を行い、2つのレーダプロ

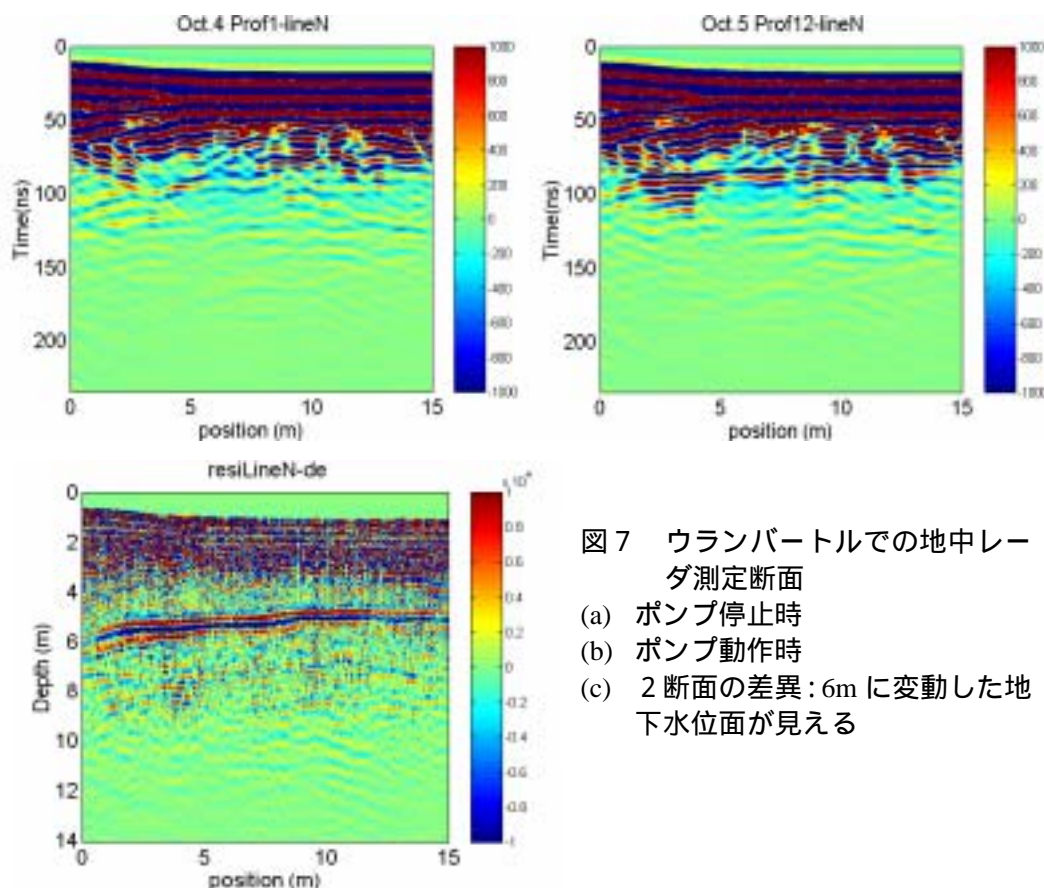


図 7 ウランバートルでの地中レーダ測定断面
(a) ポンプ停止時
(b) ポンプ動作時
(c) 2断面の差異: 6m に変動した地下水位面が見える

ファイルの差を表示したものである⁽⁹⁾。深度 5m 付近に大きな変化が現れており、ポンプによる取水が井戸周囲へ及ぼす影響を明らかに検知している。こうした地下水の流動検知は、汚水や油の流出防止など環境計測に役立つ技術として期待されている。

2.4 遺跡調査

日本国内には貴重な移籍が数多く発見されている。この中には、既に遺跡の存在が知られていて、調査を行う場合と、道路や建物建設に伴って発見された遺跡の調査が含まれる。後者の場合、本来の建設を円滑に進めるため、遺跡を速やかに調査し、保存または記録する必要がある。遺跡の範囲や、規模を短時間で把握するために地中レーダは極めて有効である。また、発掘調査に先立ち遺跡の構造を可視化できれば、発掘による遺跡の損傷を防ぐことも可能となる。遺跡調査では埋没した住居跡や古墳内部などに地中レーダが応用されてきた⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁴⁾。

2.5 土壌環境汚染

汚染物質が土壌中に残ることによって生じる土壌汚染は汚染物質自体の危険性、地下水への混入によって生じる二次的汚染拡散など、多くの問題を抱える。石油系物質などの土壌汚染物質は水分を多量に含むわけではないので地中レーダによる検知は必ずしも容易ではないが、水を含む他の地層とのコントラストを生じることなどにより、地中レーダによるイメージングが可能ではないかと考えられている。今後国内でも非常に需要が高い分野であり、現在研究が進められている。

2.6 地雷検知

東欧各地、カンボジア、アフガニスタン、イラク等紛争終結地に残された地雷が住民の生活復興に多大な被害を及ぼしている。人間が地雷を直接検出して処理することは危険な上非常に時間を要するため、地中レーダを用いた地雷検知研究がアメリカ、カナダ、EU諸国において以前から取り組まれてきた。しかしこうした研究の多くは戦略的地雷除去とよばれる軍事車両が安全に走行できることを除去のめやすとしたものである。これに対して農耕地などでの住民の安全を確保するための人道的地雷検知・処理に地中レーダを利用する研究は十分には進められていない。

地雷検知には金属探知器が使用されてきたが、金属をほとんど含まないプラスチック製地雷の検知が難しいのと同時に砲弾の破片など地雷以外の金属片による誤検知が問題となっている。地中レーダによる地雷検出の最大の特長は、金属・非金属を問わない検知能力にある。加えて地中レーダの可視化能力により地雷とそれ以外の物体の識別が期待される。

地雷は対人用で数cm、対戦車用で20-30cm程度の大きさであり、通常地中レーダに使用される上限周波数1GHzでも1波長以下の大きさでしかない。またプラスチックやTNT火薬の比誘電率はいずれも3から5程度であり、乾燥した土壌に近い反射係数が小さい。加えて対人地雷は地表面、あるいは地表から数cm程度の浅い深度に埋設されており、荒れた地表面による乱反射（クラッタ）が地雷からの反射波検知を困難にしている。このため地中レーダによる地雷検知技術は十分実用に至っておらず、各国が研究を進めている。

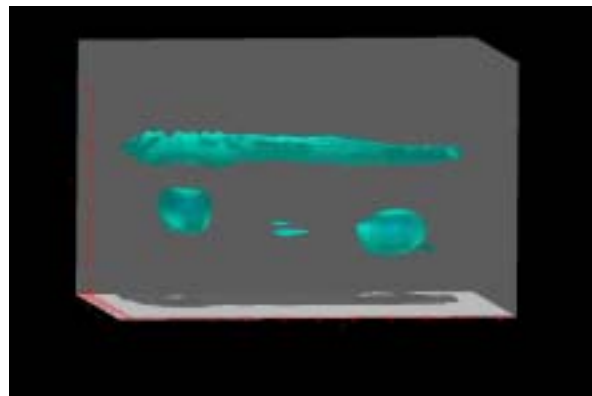


図8 合成開口処理したレーダ波形による埋設された地雷モデルの3次元イメージ

我々の研究グループでは地中レーダの可能性と限界を明らかにするため室内模擬地雷検知実験を行っている。検知対象は直径 80mm、厚さ 40mm の実物の形状を模擬した地雷モデルである。小さい物体の 3 次元イメージングを行うため、周波数は 1 GHz - 10GHz の広帯域とし、分解能を数 cm 程度まで高めている。新たに設計した広帯域アンテナを地雷モデルを埋設した砂箱の上を 1cm 間隔で走査しながらデータを取得し、合成開口処理を行った。図 8 に 3 次元イメージを示す⁽¹⁵⁾。地表面からの反射波と地雷モデルからの反射波が明瞭に識別されている。実験室レベルではこのようにプラスチック地雷の検知は不可能ではないように思えるが、実際に地雷が埋設されている環境では地表面の粗さ、土の不均質などによって、このようなイメージングが容易には行えないのが現状である。

図 9 は現在開発中のハンドヘルド型地雷検知装置である。本装置は金属探知機と GPR の複合センサであり、検知作業が効率的に行えることを目的に設計されている。本装置は 2004 年 9 月、アフガニスタンでの評価実験を予定している。こうした問題を克服しつつ地中レーダによる人道的地雷検知技術を可能にすることは、地中レーダ技術の社会貢献という意味でも需要であると考えている。

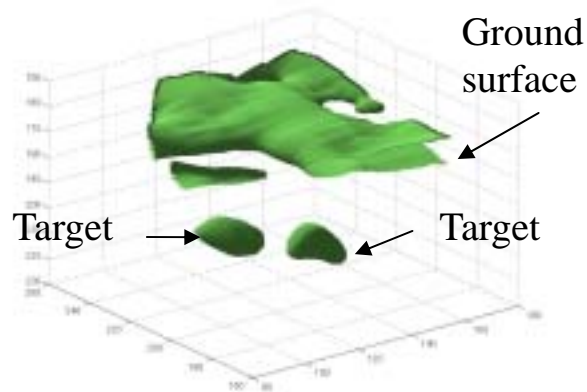


図 9 ハンドヘルド型地雷検知装置（金属探知機と GPR の複合センサ）

3 まとめ

地中レーダ計測の特長は、簡易な装置で高速・高分解能の計測が短時間に行えること、金属、非金属を問わない検知が可能なこと、地中の水分に対する感度が高いことがあげられる。これらの特性を活かし、埋設物検知、遺跡調査、非破壊検査などへの実用的利用が進められている。反面、従来の地下計測方法に置き換わるほどの普及はしていない。地層の電気的特性は場所によって大きく変化し、また降雨などによる影響も大きい。電気特性と測定周波数は密接な関係にあり適切な装置を利用しないと十分な性能が得られない。地中レーダを試しに利用する場合、装置を変えながらテストすることができず、期待した探査結果が得られないこともありうる。電波と地中物質の物理的性質から地中レーダの応用限界は自ずと定まり、それを越える計測は不可能である。こうした基本原理を十分理解することが今後地中レーダの応用を押し広げることは疑う余地がない。地中レーダの問題である探査距離については、井戸の中で地中レーダを利用するポアホールレーダの利用で解決できる場合もあり、廃棄物地層処分などへの応用が検討されている⁽¹⁶⁾。

電波を利用した技術は地中レーダにとどまらず、より低周波を利用した深部地下探査も環境・資源計測に有効である。地球環境計測は、環境保護と監視に今後重要性を増していくものと考えている。

参考文献

- (1) D.J.Daniels, Surface-Penetrating Radar, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1996
- (2) 佐藤、利岡、物理探査ハンドブック、手法編 第7章地中レーダ、物理探査学会、1998
- (3) Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., “Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines,” *Water Resour. Res.* 16(1), pp.574-588., 1980.
- (4) 地下電磁計測ワークショップ論文集 <http://cobalt.cneas.tohoku.ac.jp/users/bumon/>
- (5) 国際地中レーダ会議論文集 <http://borneo.mp.tudelft.nl/~evert/gpr2004/>
- (6) 佐藤源之、地中レーダによる地下イメージング、電子情報通信学会論文誌 C, vol.J85-C, No.7, 520-530, 2002.
- (7) 佐藤 源之、地中レーダ技術、セメント・コンクリート, No. 593, 1-8、July, 1996.
- (8) Y.Nakashima, H.Zhou and M.Sato, “Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous reflections,” *Journal of Applied Geophysics*, Vol.47, Issue3-4, 241-249, July 2001.
- (9) Qi Lu, Motoyuki Sato, “Ground Water Monitoring by GPR in Mongolia,” *Proc. Ninth Int. Conf. Ground Penetrating Radar*, Santa Barabara, USA, 545-550, 2002.
- (1 0) H. Zhou and M. Sato, “Application of Vertical Radar Profiling Technique to Sendai Castle,” *Geophysics*, vol.65, no.2, 533-539, March-April 2000.
- (1 1) H. Zhou and M. Sato, “Archaeological Investigation in Sendai Castle using Ground-Penetrating Radar,” *Archaeological Prospection*, 8, 1-11, March 2001.
- (1 2) 佐藤源之、路原、新妻弘明、ボアホールを利用した地中レーダ計測 -群馬県田尻遺跡への応用- 物理探査、50, 196-207, 1997.
- (1 3) 西村康、日本の美術 No.422 遺跡の探査、至文堂、2001.
- (1 4) L.Conyers, D.Goodman, *Ground-Penetrating Radar – An Introduction for Arcaheology*, Altamira Press, Walnut Creek, CA, USA, 1997.
- (1 5) 佐藤 源之、方 広有、曾 昭発、地中レーダによる地雷検知に関する基礎研究、電子情報通信学会 信学技報 AP-2002-59,2002.
- (1 6) 佐藤源之、ボアホールレーダ、地質ニュース, 537, 29-35, 1999.