

II-48

地中探査レーダーを用いた地層構造の現地探査

北海道大学工学部 正 員 藤田陸博

北海道大学工学部 学生員 市原裕之

1. はじめに

地中探査レーダー（以下地中レーダー）は地下の調査物を非破壊で土中を乱さず観測でき、時間的にも空間的にも連続に調査できる特徴を持っている。これまでは地中レーダーは、ガス、水道などの埋設管の調査や、道路下面、トンネル壁面裏の空隙調査などに用いられてきた。本研究では地中探査レーダーの水文分野への応用を検討しており、同時に三種類の規模の違うアンテナを用いたより高精度な地中探査技術の開発を目標としている。これまでの地中探査レーダーに関する研究では、文献(1)の様にガス管や地下ケーブルなどの単純な形状の埋設物についての調査が主で、飽和（不飽和）土層など含水状態が違う場合についての検討は少なく、これからの研究課題の一つになっていた。本研究ではこれまで、実験室の砂層を用いた計測を行ってきており埋設物体や含水量の違う土層についての、実験やデータ処理を検討してきた。それにより、深度を高精度で確定することは難しいが、単一砂層について、埋設物や含水状態の違う土塊の探査が可能であること確認している。本論文では、より状況が複雑である実際の現場での計測を行い、実験室レベルで得られた経験、方法が現地計測にどれだけ適用できるかを検討したものである。

2. 地中探査レーダーの概要

本研究では、日本無線（株）製地中レーダーを使用した。その地中レーダーには、表-1に示す諸元を持つ三種のアンテナが用意されている。地中レーダーの構成は図-1に示すように本体装置（本体表示器）とアンテナよりなる。原理を簡単に紹介すると、アンテナ内の送信アンテナより発射された電磁波が埋設物に反射し受信アンテナに戻るのに要する時間と、土などの誘電率より、埋設物の深度を測定出来るよ

うになっている。

この地中レーダーの機能について簡単に説明すると、測定方法として「移動測定」と「定点測定」が用意されている。「移動測定」はある区間の地下を探索するために、測定区間上をアンテナを移動させて行うものである。「定点測定」はある地点の地下の状態の時間変化を測定するときの方法で、測定地点にアンテナを固定し、例えば含水量の変化や土中の空隙の変化など、土の中の状態を時間を追って測定するものである。本体装置にあるモニターに映るデータの表示方法にはAモードとBモードの二通りの方法が用意されている。それぞれ図-2に示す。Aモードは縦軸に深度、横軸には受信波の強度を示したものである。Bモードは前述した受信波の強度を色分けして横軸には「移動測定」の場合は距離、「定点測定」の場合は時間を表示する。

アンテナの種類 名称 形 名		寸 法 W H D	周波数帯域 (MHZ)	パルス幅電圧
中 型	NJJ-34	668x260x881	50~400	2ns・80V
小 型	NJJ-33	558x260x731	100~600	2ns・80V
超小型	NJJ-42	270x236x320	200~850	2ns・80V

表-1 アンテナの緒元

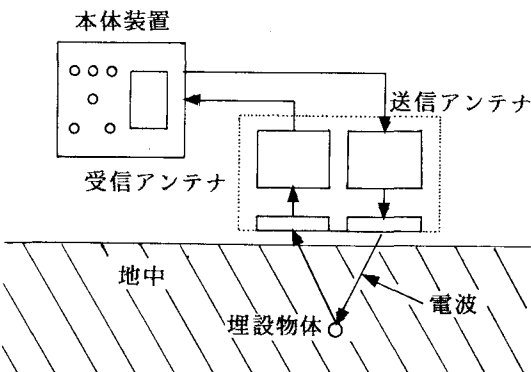


図-1 原理図

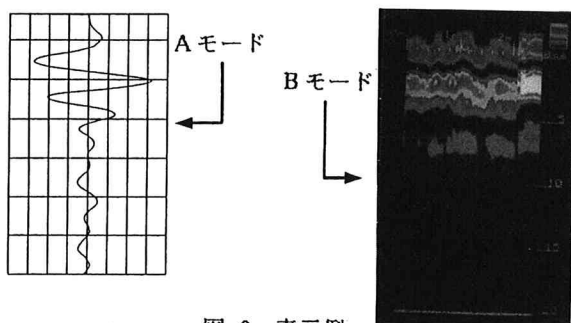


図-2 表示例

3.これまでの研究

これまで本研究では、実験室レベルで主に以下のような研究を行ってきた。一つは、“地中の物体の調査”、もう一つには、“土中の水分の調査”である。前者についてはこれまでに民間企業、例えばNTT等、で研究されており成果が報告されている(文献1)。後者については、地中レーダーの水文分野への応用のために、土の含水状態による誘電率の違いから土中の地下水面など含水状態の違う部分の調査等への地中探査レーダーの利用を検討するものである。土中水の影響についてはこれまで現地計測等でも指摘されてきており、本研究でも実験室レベルで土中水の地中探査レーダーへの影響を確認した。次に述べる実験で土中水の状態(サクション(cmH_2O))と地中レーダーの映像(Bモード、定点測定)との間の相関について確認している。

4.実験の概要

この実験には普通砂を用い、深度1.5mの砂場を用意した(図-3)。その砂場に深さ方向に40cm、60cm、80cm、100cmの位置にテンシオメーターを埋設し、アンテナは超小型アンテナを用いることにした。これは超小型アンテナは他のアンテナと比較すると地表面の影響によるエコーが小さくかつ感度がよく、この程度の深さの計測に相当と考えられるからである。測定は「定点測定」で行い、砂に水を与え本体装置の映像に変化がなくなるまで給水、(2~3時間)画像に変化がなくなるのを確認し、給水を止め画像の録画と同時にテンシオメーターの値を記録した。40cmに設置したテンシオメーターは設置条件が悪く計測を行えなかった。実験結果を図-4に示す。計測の間、地下水面はいずれのテンシオメーターの上にあるボーラスカップには正圧がかかっていた。サクシ

ョンの値を見ると測定開始より30分以内とそれ以降とでは変化の割合に違いがみられる。画像の変化と比較するとサクションの変化の割合の大きい30分以内では画面にも反射波の層の沈降が見て取れる。それ以降は、画像にもほとんど変化が見れなくなり反射波の層自体が段々薄くなっていく。

これにより土中水と、地中レーダーの映像とに強い相関があることが確認された。

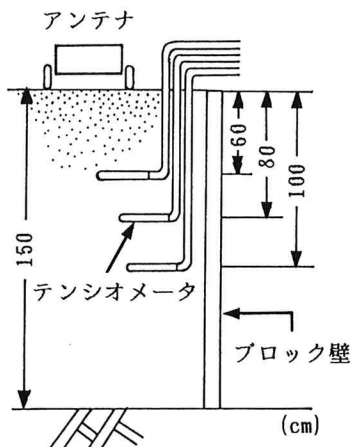


図-3 実験図

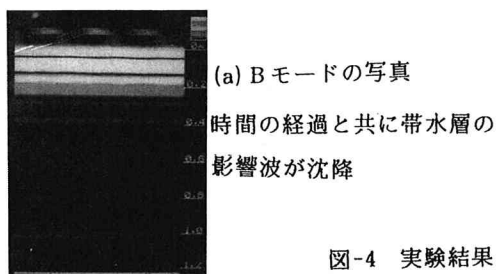
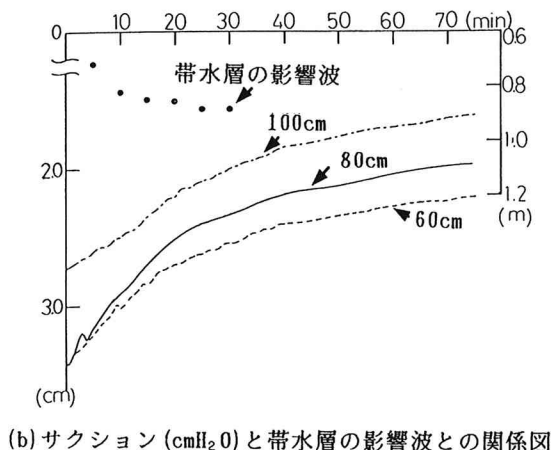


図-4 実験結果



4. 今回行った現地計測の概要と目的

埋設物の調査や土中水探査について地中レーダーの可能性が確認できたため、今回は実験室レベルの研究から一歩踏みでて、現場でのデータ収集を中心に観測を行った。もう一つあげられる理由としては、実際の現場においては色々な土質の土層が幾重にも重なっており、その層自体の中にも不確定な物体が埋まっている為、その影響がどのようなものか実験室での調査では確認できないことがあげられる。

そのためこれまで、次のような場所で現地調査を行った。(1)上磯町ゴルフ場建設予定地、(2)苫小牧工業高等専門学校敷地、(3)当別川樋門改修工事現場そして(4)網走川改修工事現場である。このうち(2)、(4)は地下水位が高い場所なので地中レーダーの地下水位調査に利用できるものと考えられ、その検討を行い、(1)、(3)については山中であったり、土手上であるので地下水位についての検討は難しいと考えられ主に土層深さや厚さの判定を行った。

5. 調査の概要

(1) 上磯町ゴルフ場建設予定地の現地調査について

1991年5月、上磯町ゴルフ場建設予定地で行った。現場は取付道路敷設予定地で、掘削の予定があった。地中レーダーの土層調査への適応を後で確認するため、調査地を選んだ。現場は、粘土層の上に客土を行っておりその厚さは20~30cmほどだった。計測は、中型、小型、超小型アンテナを使って決められた区間について「移動測定」を行った。

結果

超小型アンテナについては測定深度が深かったために測定は事実上無意味なものとなったが、中型、小型アンテナについてはBモード画面に似たような形の層が現れた(図-5)、そして測定開始地点と終点において1mほど掘ると、それぞれ違う土質の層が現れた、従ってBモードに画面現れるような土層の湾曲が起こっていることが想像され、Bモード画面と実際の土層との対応しているものと考えられる。現場は玉砂利の混じった砂層(粘土層)のうえに客土した元牧草地で、客土の下面には掘り返した痕跡は無い場所だった。土層が乱されず違う種類の土層の境界がはっきりしたため、反射がはっきりとして、識別が容易になったためである。

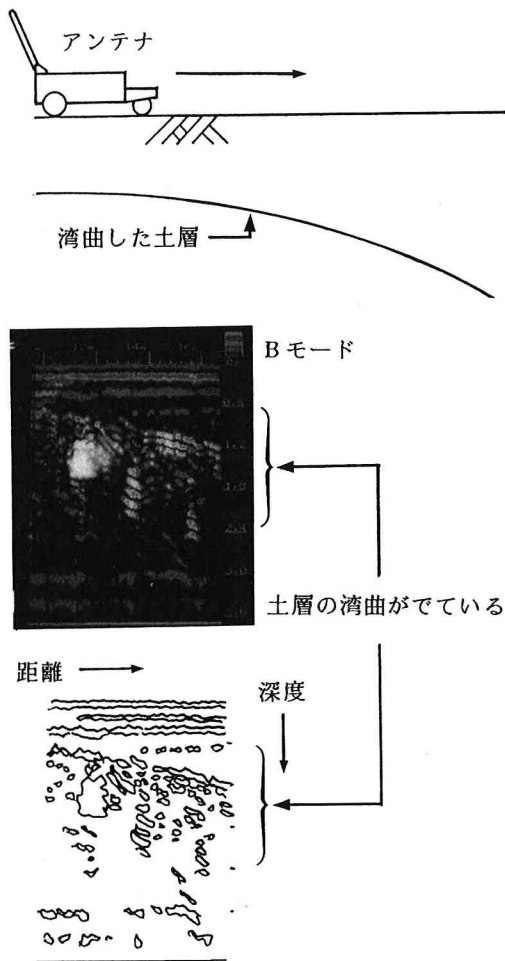


図-4 実験の概要と実験結果

(2) 苫小牧工業高等専門学校の現地調査について

同年6月、苫小牧市、苫小牧工業高等専門学校敷地内で行った。同調査地は地下水位が高く(約1m)地中レーダーによる地下水位調査において適当な地点と考えられた。調査は(1)の時と同様に「移動測定」にて行った。

結果

(1)で行ったときに出了ようなはっきりとした境界面は出なかった(図-6)。現場の土質は地下約4mまで、礫や軽石の混じった火山灰質砂の土層であった。そのため地中レーダーの電波が、礫などの干渉を受けたのだらうと考えられる。

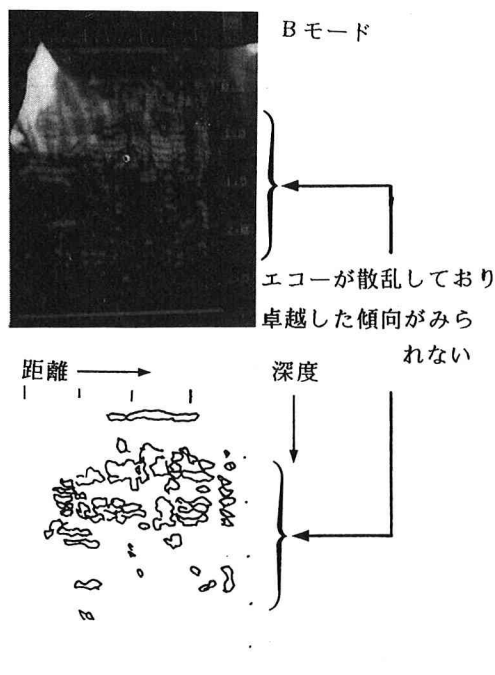


図-6 実験結果

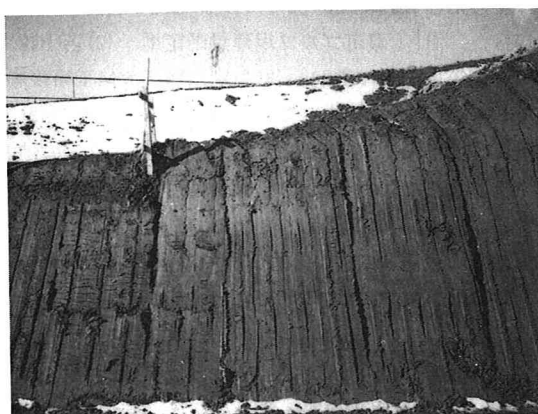
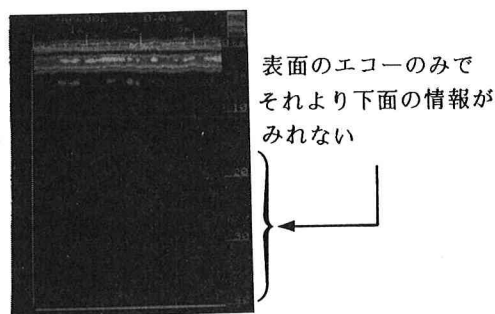


図-8 実験結果と開削断面の写真

(3) 当別川樋門改修工事現場

同年10月、当別町当別川沿で行った。現場は土手の拡幅工事の為樋門の改修工事が行われる場所で、(1)のケースと同様に後日、地中レーダーの計測結果との比較が可能な地点であった。調査は「移動測定」で行った。(図-7)

結果

画像(Bモード)上には特徴的な傾向はなんら現れなかった。土手の開削断面によると土手は単一の粘土質の土質に造られており、地中レーダーが探知するような物体があるような情報は得られなかった。(図-8)

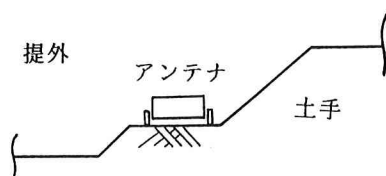


図-7 計測状況

(4) 網走川改修工事現場

同年11月、網走市網走川河口付近にて行った。現場は網走川近傍(堤外)の工事現場で、地下水面が高く、地中レーダーで地下水の調査に適した場所と考えられた。パワーショベルで掘削して地下水面を確認しながら、「移動測定」を行った。

結果

予め地下水面高さが確認できたのにも拘らず、Bモード画面上それらしき影響が現れなかった。土質は、有機質の影響による色の違いはあったが土質は粘土分の多い単一の土質であった。含水比は具体的に測定はしていないが、非常に湿気の富む土であった。画面(Bモード)に、地下水面と思われる映像が現れなかったのは、地下水面は毛管上昇の影響により境界面ははっきりとしていないため(1)の調査で得られたようなはっきりとした層構造を持った反射波が得られないのだと思われる。実験室における普通砂を用いた実験においては地下水面が判断できたのは、毛管上昇高が密な粘土質より低くこのケースより境界がはっきりしたためだろう。

6. 現地調査についての考察

以上に述べたように地中レーダーを用いて様々な実験を行った。これは実験室に設けた単一種の砂質においては電磁波が地下水面を反射しているのが確認出来、エコーの処理などの問題が残っているが、実際の現場においての調査との適合性がどれくらいあるか調べてみるためであった。

結果は、一見して理解できるものはほとんどなく何らかのデータ処理が必要と感じられた。本研究で用いている地中レーダーには何種類かのデータ処理機能が内蔵されている。これらの機能は、この地中レーダーが舗装路面下の埋設管などの探査を指向して開発されているため、地表面のエコー除去に重点をおいている事があげられる。その機能では処理できるのは深度についてはおおよそ50cm(砂の場合)ぐらいの深さについてまでで、それ以下については、地中レーダーの情報をパソコンなどでデータ処理を行わなければならない。実験室の砂層について実験を行ったデータについてこれまでに何種類かの試みを行っている。埋設物がはっきりと形を持っているときなどある程度有効な場合もあったが、現状ではまだ、現場調査のデータには有効なものではないと考えられる。

7. データ処理について

現段階ではまだ有効なものになっていないが、研究を進めていく上で、パソコンなどの活用したデータ解析が重要になってくるだろう。パソコンなどによるデータ解析が有効な点は、中型、小型、超小型のアンテナの違ったデータ比較できること、いままで熟練者のみにしか判断できなかった画面上のデータ(例えばBモードなど)が第三者によっても判断できるものとなる可能性があること、等があげられる。

データ処理する上で、本研究で現在問題となっている事項を項目別に以下に述べる。

(1) データ収集上の問題点

これまで行ったデータ処理では、同じ地点での変化をアンテナの大きさごとに比較する方法であるため、同じ場所でのデータがアンテナごとに必要であった。現在の地中探査レーダーのタイプでは、整地されて

いないような荒れた地表上での調査が苦手で、「移動調査」では同じ条件で繰り返し調査は難しい。

(2) データ自身の問題点

現在、地中レーダーから得られるデータの形式は、Aモード表示で本体モニター上に映る画像の座標点だけであり、実際の電波強度の実際の値が分からない。このため、地層や埋設物の比較において定量的な扱いを行う事が難しい。Bモード表示でもデータはAモード表示のデータがつながっているだけである。このため、Aモードで表示される波形をみても、鉄かコンクリートかなど物体の種類までは現在では分からない。しかし、実際は鉄やコンクリートなどの埋設物、そして砂や土や粘土が持つ誘電率 ϵ (比誘電率 ϵ_r)など物質がそれぞれに持っている物性量が違うので、送信して反射して受信してくるまでの電磁波の変化は個々で違うはずである。従って、電波の反射強度の値を細かく調べて行けば、上記の違いが分かるはずである。しかし実際には、モニター上に表示されるデータは、本体装置内で感度修正や補正を行い見やすくしたA(B)モード表示の座標であり、それは困難なものとなっている。

現在用いている地中レーダーは、土中の埋設管調査など、ある程度限定された用途の為に開発された装置であるため、本体装置に内蔵されている機能、感度調節やその補正、そして、誘電率調整等は、データ処理用に”純粹”なデータほしいときなどは、これらの機能がかえて、計測時に混乱をきたす原因のひとつになっている。

(3) 埋設物の形状の問題

「移動測定」で埋設管などの上を横切るときなど、Bモード画面上のエコー形状より判断しやすく、データ処理も簡単に行えるが、調査対象が、地下水面など平面形状の場合、Bモード画面による判断も、データ処理も難しくなる。これまでも、中型、小型、超小型アンテナの違った周波数によるデータを利用しているデータ処理を試みているが、前出の(1)に述べたようにデータの精度に問題が残っているため満足できる結果をまだ得られていない。

埋設管の様な物体においても、アンテナから発射される電波は10-9secのオーダーのデルタ関数のよう

なパルス波で、これは幅にして数cmのオーダーである。従って、数cm単位の埋設物について調べる際に困難が生じることが予想される。

8. 今後の展望

現在、一般では装置の癖のような物を理解した方が、実際の現場において役立つという考えに立ち、企業などでは熟練者を養成して、地中探査レーダーの普及をはかっているようである。本論文では、現地調査による経験よりデータ処理の難しさについて議論した。今後、地中レーダーのデータ処理をする上で、7.で取り上げた事項を解決しなければならず現在検討中である。

謝辞

本研究は文部省科学研究費（試験研究 研究代表者 藤田睦博）の援助を受けた。関係者各位に謝意を表す。

参考文献

- (1) 地下電磁計測ワークショップ論文集－地中探査レーダー、ボアホールレーダー－現状と展望－、1989
- (2) 藤田睦博、市原裕之、許士達広：“地中探査レーダーの特性に関する研究”、土木学会北海道支部論文報告集第47号、1991
- (3) 藤田睦博、市原裕之、許士達広：“地中探査レーダーの特性に関する研究”、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第2部、1991