

電気・電磁探査法による浅層地盤の 非破壊プロファイリング調査技術

光畑 裕司¹⁾・稲崎 富士²⁾

1. はじめに

近年, 工場跡地における廃液や化学物質の漏洩, あるいは産業廃棄物の投棄に起因する地質環境汚染(土壌汚染・地下水汚染)の問題が顕在化し, 汚染領域や廃棄物を地表から非破壊で探査する物理探査法の適用が試みられつつある。また, 土木や防災分野においては, トンネル工事やダム建設あるいは地滑りや液状化の地盤・岩盤評価に物理探査法が適用され, 最近では, 河川堤防の脆弱部調査に適用されつつある。さらに, 農業や工業での地下水の利用に関して, 地下水探査や塩水化の調査に物理探査法が従来から利用されている。このように, 地表からせいぜい深度数十メートルまでの比較的浅層領域を対象とした物理探査は, Near Surface Geophysics (Butler, 2005)と呼ばれ, また土木・環境分野への適用を対象としてEnvironmental and Engineering Geophysics (Sharma, 1997)と呼ばれている。加えて最近では, 地下水や地盤水理構造把握を目的としたHydrogeophysics (Rubin and Hubbard, 2005)という呼称も欧米では使用されつつある。広範囲な調査エリアを, 地盤を掘削することなく, すなわち非破壊で調査できれば, 効率が良く, しかも調査自体による汚染の拡散を無くすることができる。物理探査には, そのような役割が期待されている。

これら浅層地盤を対象とした物理探査法には, 電気探査法, 電磁探査法, 地中レーダ法, 弾性波反射法, 表面波探査法等様々な手法があるが, 本論では, その中で, 最近, 利用が拡大しつつある二つの手法, マルチ周波数固定式小型ループ電磁探査法とマルチオフセット牽引式キャパシタ電極比抵抗法について, その原理と装置, および適用事例について報告する。これらの探査手法を適用すれば, 広範囲な地盤

の比抵抗分布を効率よく把握することができる。比抵抗は電気の通しにくさを表す物性値で, 電気伝導率あるいは導電率の逆数である。地盤の比抵抗は, 間隙率, 水飽和度, 間隙水のイオン濃度, 間隙がつくる管のつながりや曲がり具合, 粘土鉱物などの細粒固相粒子の存在に依存する。

2. マルチ周波数固定式小型ループ電磁探査法

2.1 電磁探査法の原理

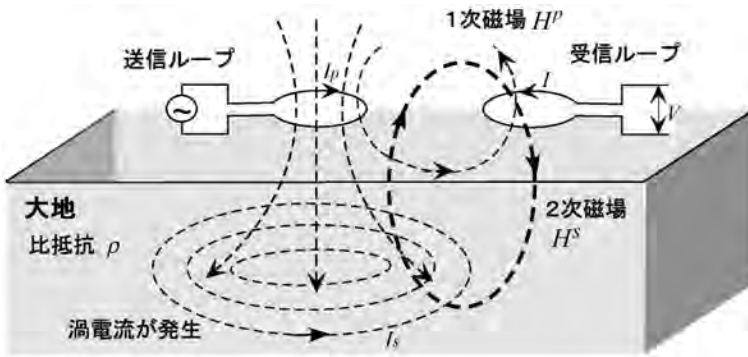
電磁探査法は, 時間変動する電場と磁場の相互誘導を利用して地下を探査する手法である。したがって, その原理は電磁気学を基礎として説明されるが, 電磁場の波動としての反射・伝播を利用する地中レーダとは異なり, 数MHz(メガヘルツ)以下の低い周波数を利用する。このような数MHz以下の周波数帯域では, 電磁波発生の原因となる変位電流が無視でき, 電磁場の変動は準定常状態にある, あるいは擬静的近似で記述される, と表現され, 電気工学分野では渦電流問題として取り扱われる。電磁探査法は, 地中レーダのような電磁波を利用した探査法と明示的に区別するために, 電磁誘導探査法と呼ばれることもある。

電磁探査法の原理を簡略に説明する(第1図)。送信ループから時間変動する磁場を発生させると, フェラデーの電磁誘導の法則に従い地盤中に誘導電流が発生し, そしてこの電流は, アンペールの法則により周辺に新たな磁場を発生する。この新たな磁場は最初の磁場の時間変動を妨げる向きになっており, すなわち誘導電流は最初の磁場の時間変動を妨げる向きに発生する(レンツの法則)。誘導電流は発散源を持たず, 渦を成すので渦電流と呼ばれる。

送信ループを流れる電流によって直接生じる磁場

1) 産総研 地圏資源環境研究部門
2) 土木研究所 技術推進本部

キーワード: 非破壊, 浅層地盤, プロファイリング, 電磁探査, 電気探査, 小型ループ, キャパシタ電極, 河川堤防



第1図

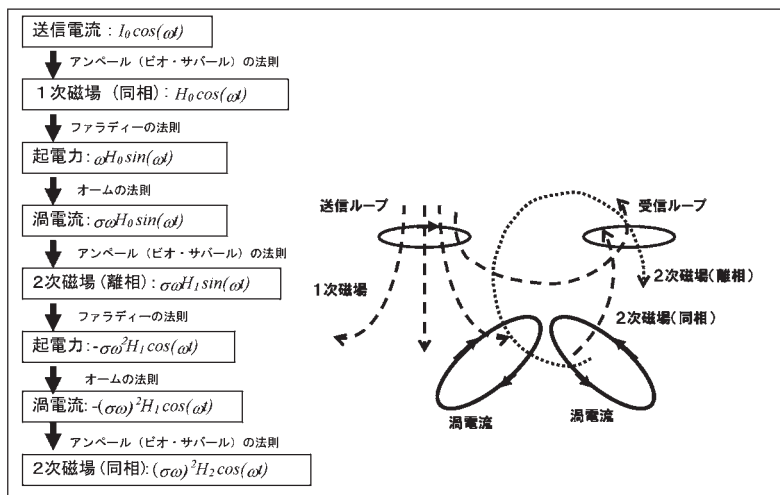
電磁探査法の基本原理の概念図。
 I_p : 送信ループに通電する電流,
 H^p : 一次磁場, ρ : 大地の比抵抗,
 I_s : 渦電流, H^s : 二次磁場, V と I
 は受信ループに生じた誘起起電力
 と電流を示す。

は1次磁場、誘導電流がつくる新たな磁場は2次磁場と呼ばれる。1次磁場は、地盤からの影響を含まず、純粋に送信ループを流れる電流値、ループの面積、形状や巻き数、そして送信ループからの距離によって決定される。2次磁場は誘導電流の大きさや分布に依存し、それは地盤内の1次磁場の分布とその時間変化、そして地盤の比抵抗分布の関数となる。電磁探査法は、既知である1次磁場を地盤への入力信号とし、2次磁場を受信信号として観測し、その受信信号から地盤の比抵抗分布を推定する手法である。

2.2 測定データ

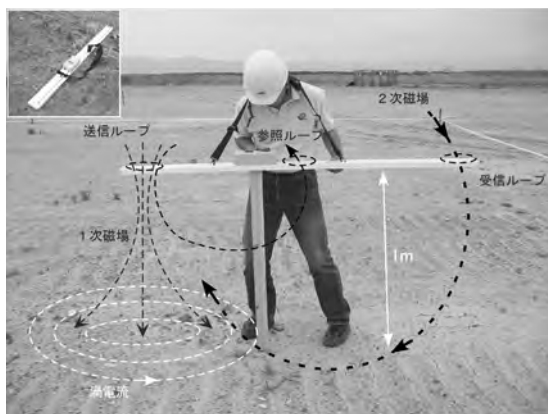
小型ループ電磁探査法では、特定の周期のコサインやサイン関数で表される連続波形で変動する電磁場を大地への入力信号とし、その応答である受信信号を入力信号と比較し、振幅や位相ずれを測定データとして記録する周波数領域測定がよく採用されている。

1次磁場に対して、ファラデーの法則により誘導電流の波形は位相が90度ずれるので、誘導電流がつくる磁場も、1次磁場に対して位相が90度ずれている。1次磁場と同じ位相を持つ成分は同相 (In-phase) 成分、90度ずれた成分は離相 (Quadratureあるいは Out-of-phase) 成分と呼ばれる。例えば、1次磁場がコサイン波形で時間変動すると、渦電流はサイン波形で時間変動し、これは離相成分となる。数学的記述では、同相や離相成分は複素数として取り扱われ、同相成分は実部、離相成分は虚部となる。第2図に示すように、渦電流によって発生する2次磁場は同じサイン波形で離相成分となるが、それが時間変化するので、さらにコサイン波形で表される渦電流が発生し、同相成分を持つ2次磁場が発生する。周波数領域測定では、このような状況が定常状態になっていると考え、1次磁場の入力信号に対して、大地の応答として同相成分と離相成分を持つ2次磁場を受信信号と考える。しかし実際には、受信ループでは送信ループか



第2図

周波数領域測定における2次磁場の同相および離相成分の発生プロセス。



第3図 Geophex社GEM-2システムによる測定の様子。送信・受信・参照ループ(あるいはコイル)を内蔵したボードを、木製棒で地表から1mの高さに保ち、測定している。

ら直接到達する1次磁場も観測され、受信信号には、1次磁場(同相)と2次磁場(同相と離相)が同時に含まれている。

1次磁場には大地の応答が含まれていないので、受信信号に含まれる1次磁場は言わばノイズである。受信信号に含まれる2次磁場は1次磁場に対して0.1%前後であり、受信信号をいくら増幅してもその比率は改善されない。受信ループに受信される1次磁場を何らかの方法で見積り、それを受信信号から取り除き、残差分を2次磁場と見なし、その分だけを増幅させることが必要となる。通常、小型ループ電磁探

査測定システムにおいて、測定されるデータは1次磁場に対する2次磁場の比を算出し、その値を百万倍したppmオーダーの形で出力される。

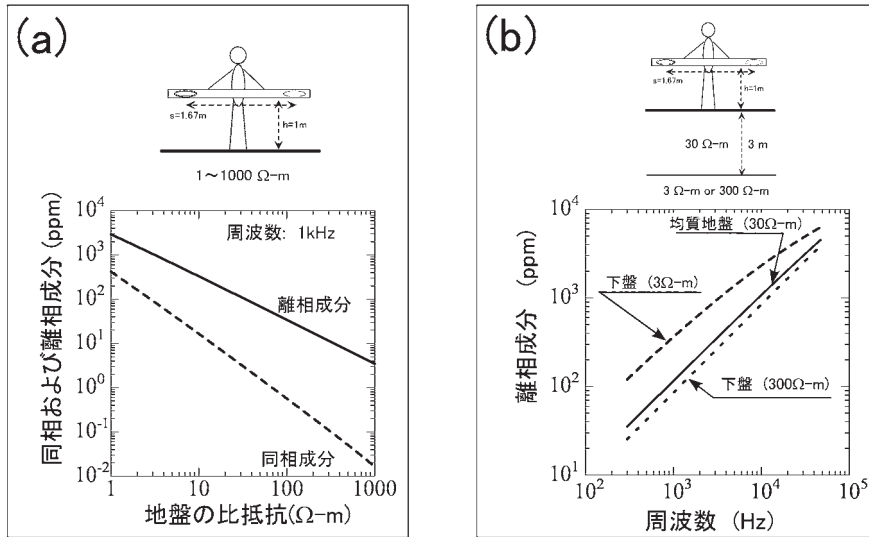
2.3 測定システム

小型の送信・受信ループを利用した電磁探査法はスリングラム法とか小型ループ・ループ法と呼ばれ、様々なタイプのものがある。本論で紹介するのは、小型の送信・受信ループを非金属性の一つの板(ボード)に固定した測定システムで、広範囲な領域を効率よく調査することが可能である。このタイプの測定システムを、ここでは固定式小型ループ測定システムと呼ぶ。このようなシステムとしては、米国Geophex社製GEM-2、カナダGeonics社製EM-31MK2、米国Geophysical Survey Systems社製EMP-400等があり、本論ではGEM-2システムについて概要を述べる。

GEM-2システムの全体写真を第3図に、仕様の概略を第1表に示す。GEM-2システムは、送信、受信ループおよびそれらの間に参照ループの三つのループを一つのボードに内蔵したシステムである。送信・受信ループの間隔は1.67mである。参照ループはバックキング(bucking)コイルとも呼ばれ、参照ループで受信する信号には大地からの応答(すなわち2次磁場)は含まれず、1次磁場のみであると仮定し、参照ループで1次磁場を常時モニターしている。測定システムは参照ループで推測される1次磁場を、自動的に受信信号から取り除く処理を行っている。測定は、測

第1表 GEM-2システムの仕様の概要。

項目	仕様
名称	GEM-2(米国・Geophex社製)
周波数帯域	330Hz~47970Hz
複合周波数オペレーション	最大15周波数(典型的には3~5)
送電線周波数モニター	ユーザーに指定周波数(50または60Hz)
ループ配置	水平または垂直(普通は水平)
送・受信ループ間隔	1.67m
電池	12ボルト標準ノートブック・コンピューターの電池パック
電池放電時間	正常な使用で8時間
アナログーデジタル変換	24 bit A/D Converter
重量	9ポンド(4kg)
基本出力	同期位相(同相)と離相レスポンス(単位: ppm)
ポジショニング	マーキングまたは外部GPSデータ入力可



第4図 GEM-2システムの応答の例。
 (a) 様々な比抵抗の均質大地に対する周波数1kHzでの応答。
 (b) 上盤が層厚3mで30 Ω-m、下盤が3または300 Ω-mの2層モデル大地に対するGEM-2システム応答の離相成分。

定システムを地表から1mの高さに保持し、歩きながらデータを取得することもできるし、あるいは第3図に示すように、個々の地点で木製の棒を支柱にし、測定システムを水平に保って、約10秒間程度データを取得する方法がある。後者の方が、測定地点の位置が正確でかつシステムの揺れによるノイズが小さいという利点があるが、多数の地点で測定を行う場合には時間を要するという欠点もある。GEM-2システムは一度に最大15周波数の電磁場の送受信が可能であり、後述するように様々な周波数におけるデータを取得することで、条件が良ければ、比抵抗の深度方向の変化を推定することが可能となる。

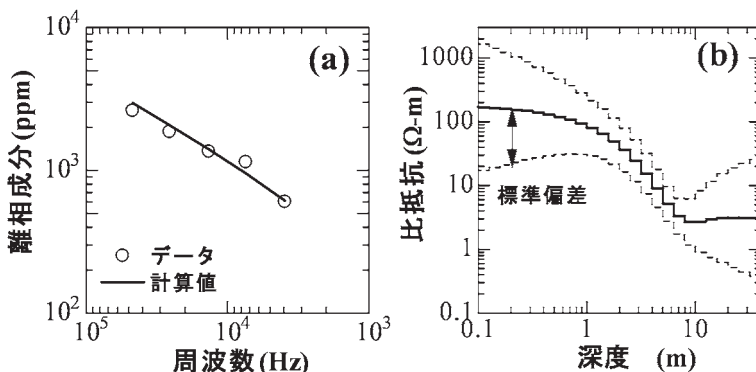
2.4 マルチ周波数測定システムによる深度方向探査

GEM-2のような測定システムを使った調査では、広範囲な調査領域を対象とするためデータ量が比較的大きくなる。そのような場合、調査現場で、測定データから簡易に算出できる見掛け導電率（あるいはその逆数である見掛け比抵抗）によるプロファイルやマップ作成が有益な情報となる。第4図(a)に、地盤の比抵抗が1から1000 Ω-mと変化した場合の周波数1kHzにおける離相成分と同相成分の割合の変化を示す。

グラフから理解できるように、比抵抗が増加するとどちらの成分も減少し、加えて同相成分は離相成分よりも小さく、減少も激しいことがわかる。グラフより、例えば1kHzにおいて離相成分の割合が、100ppmであったとすると、地盤の比抵抗は約30 Ω-mと見積もることができる。これは地盤が均質であると仮定した場合の見掛けの比抵抗値である。

第4図(b)に、上盤が厚さ3mで比抵抗30 Ω-m、下盤が3あるいは300 Ω-mの二層地盤に対する離相成分の割合を、30 Ω-mの均質地盤に対する応答と比較して示す。周波数が低下するにしたがって、地盤に生じる渦電流は、徐々に深部まで拡散してゆくの、低周波数になるにつれて、均質地盤による応答との差が大きくなり、下盤の影響が現れはじめる。しかし、下盤が3 Ω-mと300 Ω-mでは、均質地盤の応答との差の現れ方が違い、3 Ω-mについては顕著であるが、300 Ω-mについては僅かである。また、差が顕在化し始めるのは周波数の高い領域で、上盤から下盤にかけての地盤の比抵抗変化を捉えるには、高周波数領域でのデータが必要となる。

いくつかの周波数について取得したデータに対して、地盤が水平多層構造（1次元構造）であると仮定した逆解析（インバージョン）を適用すれば、前述のよ



第5図 GEM-2データの1次元逆解析の例.
 (a) ある測点における離相成分測定データ(○)と計算値(実線)の比較.
 (b) 推定された1次元比抵抗モデル(実線)とその標準偏差(破線).

うな制限はあるが、データ測定地点の直下の深度方向の比抵抗分布を推定することができる。第5図に逆解析の一例を示す。5つの周波数における測定データから逆解析により、深度1mから10m付近までの比抵抗の分布が推定されている。

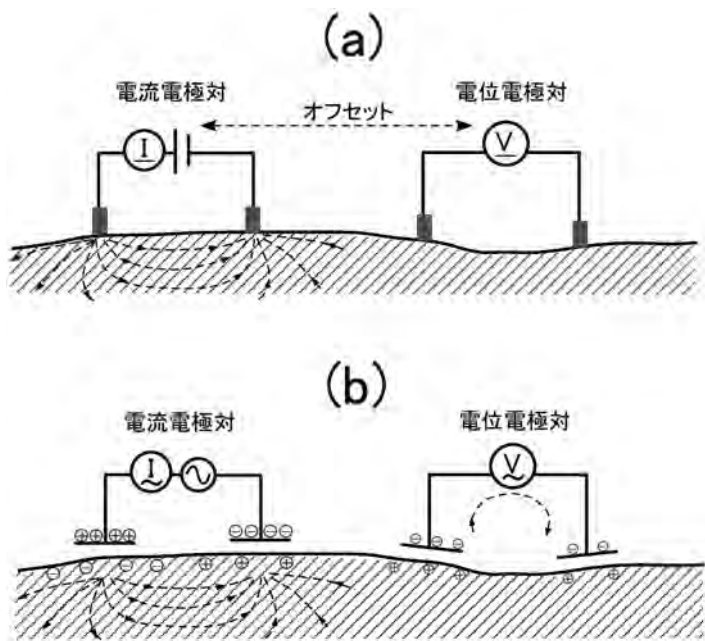
ある測線に沿って、測点を配置し、プロファイリング的に調査を実施した場合、各測点で取得されたデータに逆解析を適用し、推定された深度方向の比抵抗分布を、全ての測点についてつなぎ合わせることで、

簡易的な比抵抗断面図を作成することができる。

3. マルチオフセット牽引式キャパシタ電極比抵抗法

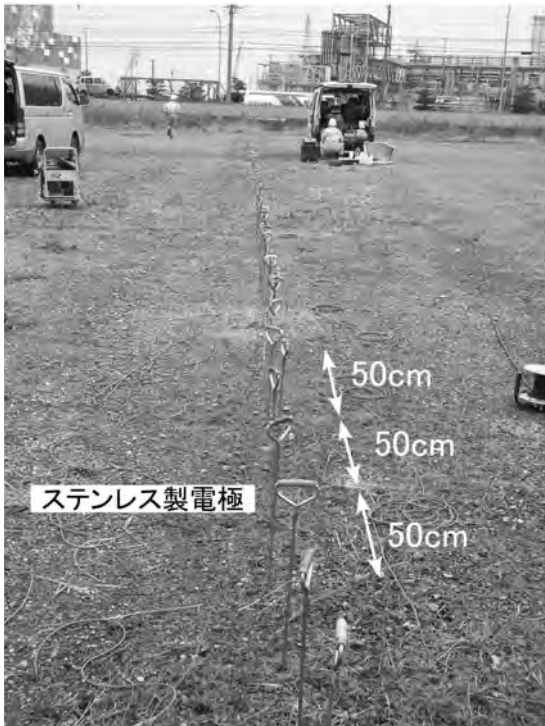
3.1 キャパシタ電極の原理

地下水調査等の様々な地盤調査に適用されている比抵抗法では、一對の金属棒電極を大地に突き刺し、直流電流を流し、そして、別の一對の金属棒電極



第6図
 ダイポール・ダイポール電極配置による比抵抗法探査.

(a) 従来の金属棒電極の接地による比抵抗法探査. 電流電極対を通じて地盤に直流電流を流し、電位電極対で電位差を測定する.
 (b) キャパシタ電極を用いた比抵抗法探査. 電流電極対に電荷を充電すると、地表に反極性の電荷が集まる. その誘導電荷とは反極性の電荷が、電位電極に集まる. 電流源を交流にすると、それらの電荷が時間的に変化し、地盤中や電位電極に電流が発生する.



第7図 従来の比抵抗法探査におけるステンレス製電極の配置例。
電極を50cm間隔で接地し、様々な電流電極対と電位電極対の組合せで測定を実施する。

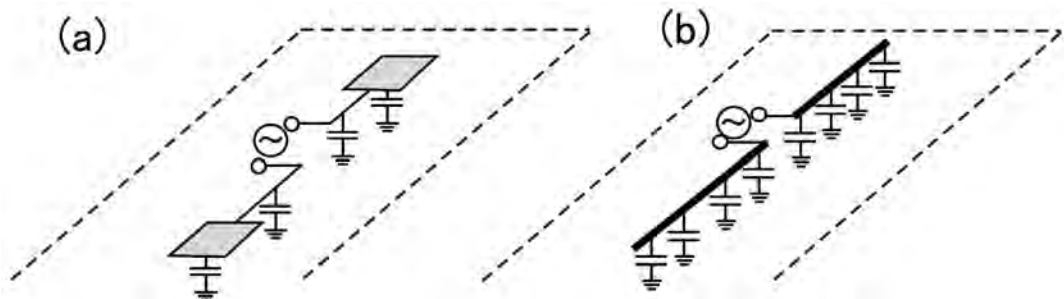
で電位差を測定する(第6図a)。そして、既知である電流値、測定電位差、各電極の位置関係から地盤の比抵抗分布を推定する(例えば、物理探査学会, 2000; 地盤工学会, 2005)。電流側の電極を電流電極、電位測定側の電極を電位電極と呼び、電流電極と電位電極の距離(オフセット)を離すことで、地盤の

より深部を通る電流の影響を感知し、深度方向の探査が可能となる。通常の比抵抗法では、例えばステンレス製の電極を地面に等間隔に打設して、電極を切り替えて、様々なオフセットの組合せでデータ取得を行う(第7図)。しかし、アスファルトで舗装された道路やセメントで固められた地面では、電極の打設は難しい。

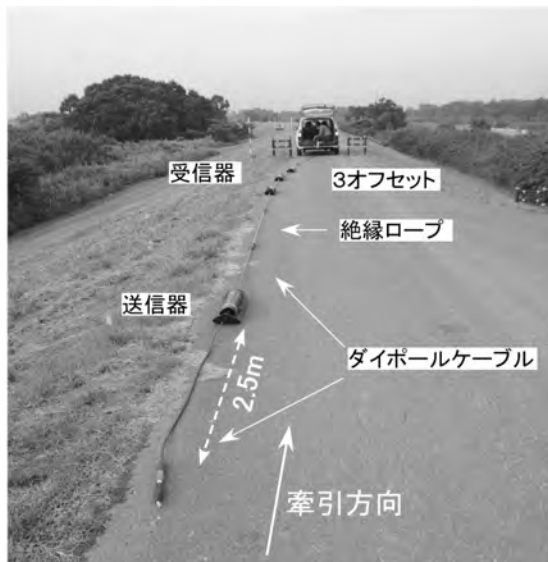
このような障害に対処するため、金属棒電極に変わるセンサーとして、地面とは絶縁された平板あるいはケーブル(第8図)を電流および電位測定用センサーとして採用したキャパシタ電極システムが比抵抗法探査に利用されている(Tabbagh *et al.*, 1993; 長谷川・島, 1995; Shima *et al.*, 1996; 小西ほか, 2005; 荘司, 2006)。地面から絶縁した平板あるいはケーブルに電圧を加え、電荷を蓄積させると、コンデンサーのように静電誘導により地面に反対の極性の電荷が集まる。加える電圧を直流ではなく、交流を用いると、平板やケーブルに蓄積される電荷が変化するので、対応する地面の電荷も変化する。電荷の変化すなわち移動は電流であるので、地盤中に電流が発生することとなる。また、電位電極側では、地面に生じた電荷分布に対応して、反対の極性の電荷が誘導される。それも、地面の電荷は交流によって変化するため、対応する誘導電荷も変化する。回路に電流が流れ、電位差を計測することができる。交流電源の周波数としては、数kHzから数十kHzの周波数が採用されている(Kuras, 2002)。

3.2 測定システム

電極の打設の必要がないキャパシタ電極システムは、広範囲で起伏の少ないエリアで調査を実施する



第8図 (a) 平板型、(b) ケーブル型のキャパシタ電極の概念図(Kuras *et al.*, 2006)。平板やケーブルと地面との間の静電容量(キャパシタンス)を利用する。



第9図 Geometrics社OhmMapperによる測定風景.

のに効率が良い。実用化されているキャパシタ電極システムとしては、平板型のもの(長谷川・島, 1995 ; Shima *et al.*, 1996)が報告されていたが、最近ケーブル型の米国Geometrics社製OhmMapperが頻繁に使用されるようになった(山下ほか, 2004 ; 小西ほか, 2005 ; 荘司, 2006)。第9図にOhmMapperの写真と第2表に仕様の概略を示す。第9図では、長さ2.5mの絶縁体で被覆されたケーブルをキャパシタ電極として、牽引方向の後方に送信器、前方に3つの受信器を配置して、3パターンのオフセットでの測定が可能となっている。

第10図に、OhmMapperシステムの測定模式図を示す。このシステムでは、受信器の数を増やしたり、絶縁ロープの長さを調節することで、様々なオフセットを実現することができる。そして、測定者がOhmMapperシステムを牽引して移動することで、異なるオフセットのデータを同時に測定しながら調査を行うことができる。オフセットの違いは、データに影響を与える地盤の深度方向の違いを反映する。すなわち、小さいオフセットでの測定データは地盤の浅い部分の影響が大きく、大きなオフセットの場合は、地盤の深い部分の影響も含んだデータとなる。したがって、OhmMapperシステムを牽引して進むことで、地盤の比抵抗断面図を連続して作成することが可能となる。

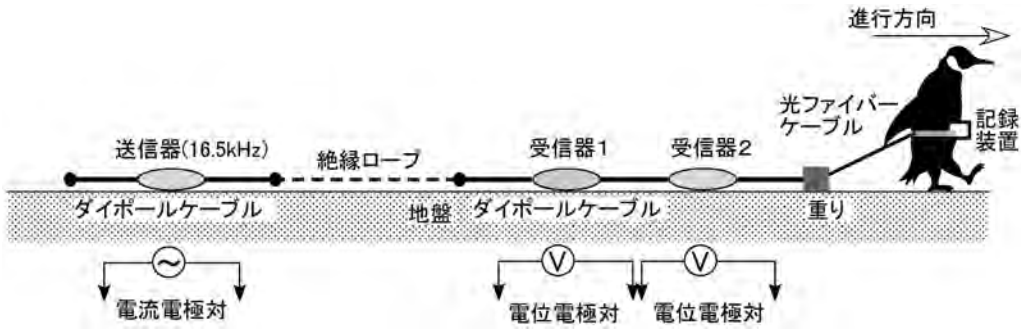
小西ほか(2005)によると、OhmMapperシステムの測定データは、ケーブルの midpoint の位置に通常の金属棒電極を配置した場合と等価と見なされる(第10図)。したがって、測定データの解析には、通常の比抵抗法データと同様の逆解析法が適用できる。具体的には、各測定地点において、いくつかのオフセットの組合せで測定されたデータに対して、地盤を水平多層構造と仮定した1次元逆解析が適用されている。OhmMapperシステムの詳細や従来の電極を打設した比抵抗法探査との比較事例は、小西ほか(2005)にまとめられている。

4. 適用事例

ここでは、適用事例として、二つのGEM-2システム

第2表 OhmMapperシステムの仕様の概要(小西ほか, 2005より)。

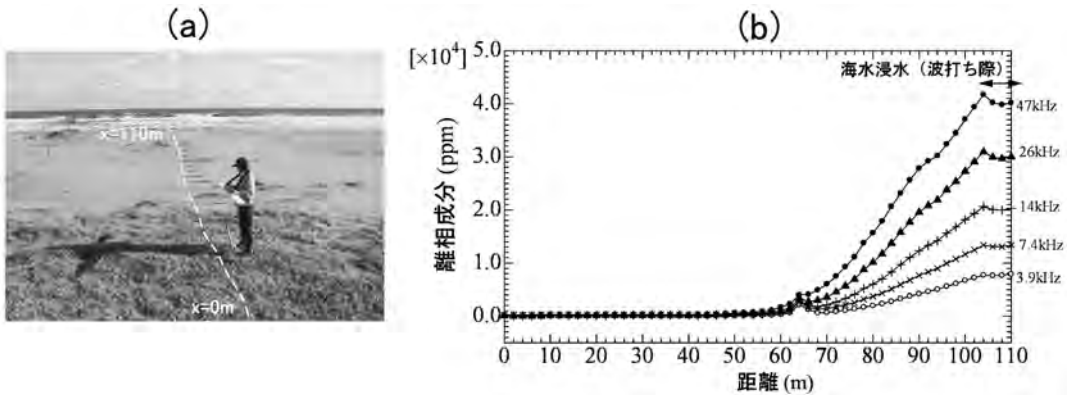
項目		仕様
名称		OhmMapper (米国・Geometrics社製)
測定レンジ		3 ~ 100,000 Ω·m
測定時間間隔		最大2サンプル/秒
データ記憶容量		2MB RAM
ダイポールケーブル長		2.5mまたは5m
送信器	送信周波数	16.5kHz
	最大出力	2W
	電流値	0.125 ~ 16mA
受信器	入力電圧値	0 ~ 2V (実効値)
	相対精度	< 3%



第10図 OhmMapperによる比抵抗法探査の概念図。

受信器の数や絶縁ロープの長さを調節することで、様々なオフセットを実現できる。

システムを牽引して前進することで、地盤の比抵抗断面図が作成される。ダイポールケーブルを電流電極対や電位電極対と見なして、通常の比抵抗法データ解析手法が適用できる。



第11図 千葉県九十九里浜における(a) GEM-2システムによる測定風景、(b) 5周波数において測定された離相成分データのプロフィール。

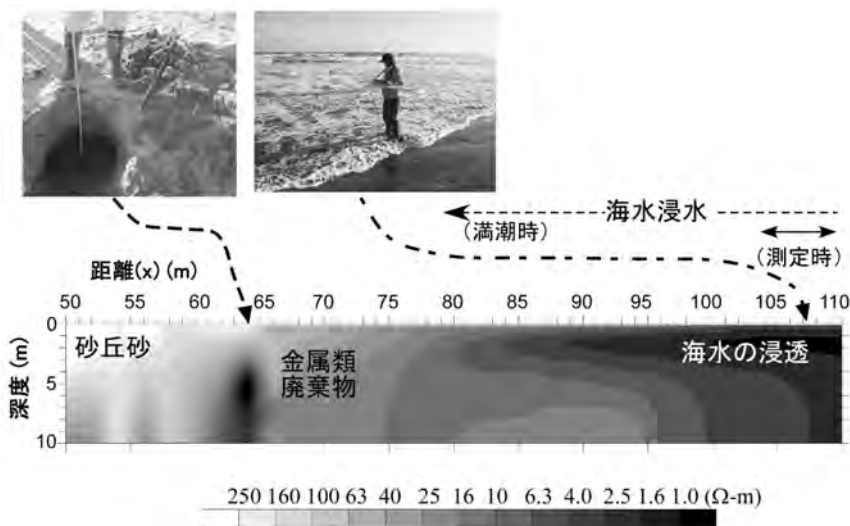
の探査実施例をあげる。一つは、海岸の砂浜で実施した事例で、もう一つは、河川堤防における堤防内部調査への適用事例で、OhmMapperシステムによる結果と比較して示す。

4.1 九十九里浜における探査実験

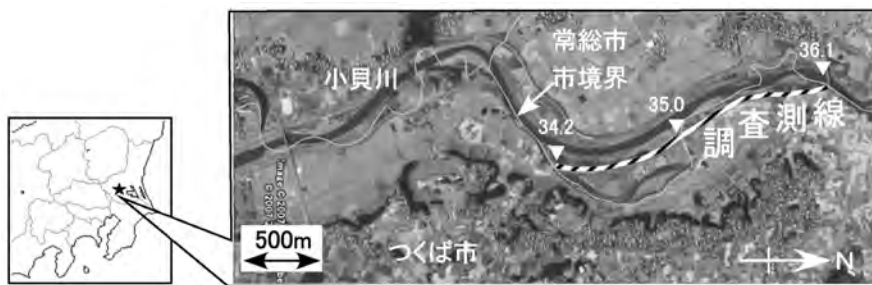
千葉県山武市九十九里浜の砂浜において、2004年1月、マルチ周波数固定式小型ループ電磁探査システムであるGEM-2の測定実験を実施した(光畑ほか, 2004)。浜辺の砂丘から波打ち際に向かう110mの測線上で、2m間隔で測定地点を設定し、各地点で20秒間程度静止し、センサーボードを地面から約1mの高さで水平に保って測定を行った(第11図(a))。測定したデータの内、47kHz~3.9kHzの5周波数の離相成分データのプロフィールを第11図(b)に示す。

x=100~110mにかけては海水が打ち寄せ、地表は海水で覆われていて、測定データは一定の値を示している。波打ち際から遠ざかって砂丘に近づくにつれて、測定データの値は減衰してゆく。x=64m付近に、データの小さな異常が見られる。その箇所を掘り起こした結果、空き缶、金属製ボール等の廃棄物が見つかった。2m間隔に並んだ各測点の5周波数の離相成分データについて、平滑化拘束付き1次元逆解析法を適用し、比抵抗モデルを推定した。

各測点で推定された比抵抗モデルをつなぎ合わせて作成した比抵抗断面図を第12図に示す。海側に海水の浸透による低比抵抗領域が存在し、それは満潮時の汀線付近まで延びている。興味深いことにその延びた低比抵抗領域の下では、やや比抵抗が高くなっていることが示されている。砂丘側では、乾燥して



第12図
九十九里浜で測定されたGEM-2離相成分データの逆解析によって推定された比抵抗断面図。右上写真は波打ち際における測定風景。左上写真は埋設されていた金属製パイプや空き缶等。



第13図
茨城県小貝川河川堤防における調査測線 (Google Earthを利用)。

いるためか、比抵抗は高くなっている。

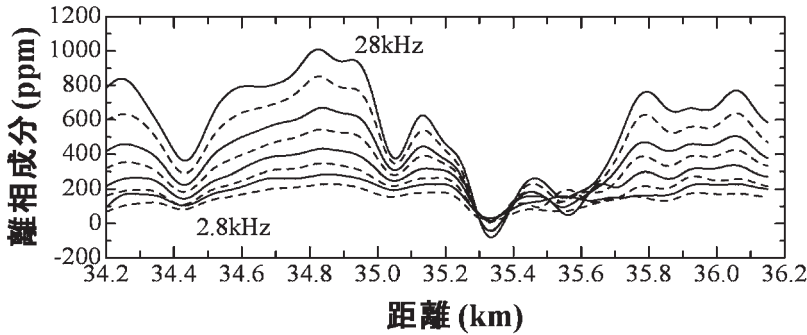
4.2 茨城県小貝川堤防における探査実験

最近、集中豪雨の発生による河川堤防の破堤被害が頻発するようになってきた。そのため堤防の脆弱部を強化することが社会的に要請され、河川に沿って長く造られた堤防の内部構造を非破壊で把握し、効率よく脆弱部を探査する技術が強く求められている(渡辺ほか, 2007)。ここでは、2007年1月に実施した、茨城県のつくば市と常総市の境界に位置する小貝川堤防調査でのGEM-2システムの適用結果を、既に報告されているOhmMapperシステムの適用結果と比較して示す。

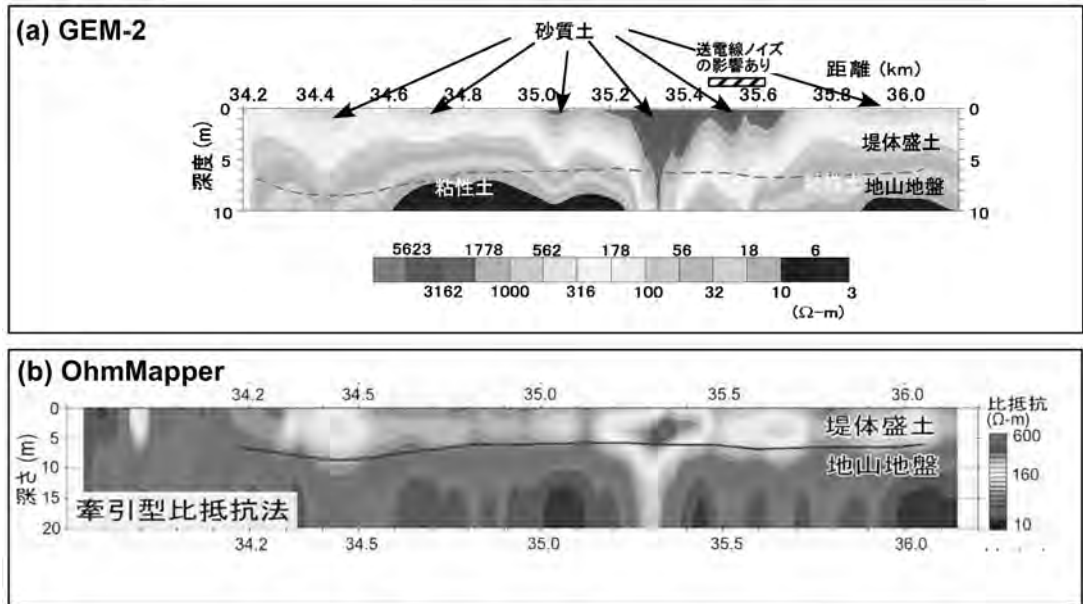
調査測線の配置図を第13図に示す。測線はアスファルトで舗装された堤防上の道路に沿って設定し、長さは1.95kmで、5m間隔の合計391測点でGEM-2システムのデータ取得を実施した(光畑ほか, 2007)。

データ取得には3名で、約3時間半の時間を要した。データのプロフィールを第14図に示す。35.2km地点から35.7km地点にかけてデータ値が小さく、比抵抗が大きいことが予想される。ただし、35.5kmから35.6km地点付近には送電線があり、人工的な電磁ノイズの影響を受けて測定データはかなり乱されていた。

第14図のデータに対して1次元逆解析法を適用し、各測点で推定された水平多層モデルをつなぎ合わせて作成した比抵抗断面図を、第15図(a)に示す。35.6km地点付近はノイズの影響のため、また35.3km地点付近はデータ値が非常に小さかったため、データを精度良く説明する水平多層モデルを逆解析で推定することは困難であったが、35.2kmから35.7km地点にかけて、測定データプロフィールの傾向が示すように比抵抗の高い領域が推定されている。堤防に沿った長距離測線での調査は、土質ボーリングなどの精査必要箇所を抽出するために実施されるので、探査の結



第14図
小貝川河川堤防上において、8周波数(28, 20, 15, 11, 7.5, 5.4, 3.9, 2.8kHz)で測定された離相成分データのプロフィール。



第15図 小貝川河川堤防調査測線における(a) GEM-2離相成分データの逆解析によって推定された比抵抗断面図, (b) OhmMapperデータ逆解析によって推定された比抵抗断面図(稲崎, 2006)。

果であるプロフィールからの異常域特定作業が必要となる。堤防内部は不飽和帯であるので、その比抵抗は主に土質によって決まる。細粒分が多い粘性土は低比抵抗を示し、粗粒分が多い砂質土や礫質土では高比抵抗を示す。堤防の浸透破壊を危惧するのであれば、透水性の高い砂質土や礫質土の箇所、すなわち高比抵抗異常を特定することが重要である。第15図(a)において、高比抵抗を示す領域が、砂質土で構成されていて脆弱部となる可能性があるかと推測できる。

第13図とほぼ同じ調査測線では、OhmMapperシステムによる探査も実施されている(稲崎, 2006)。

OhmMapperシステムによって推定された比抵抗断面図を第15図(b)に示す。GEM-2システムによる比抵抗断面図と比較して、高比抵抗を示す領域の分布は概ね一致している。ただし、両手法によって推定された比抵抗の値を詳細に比較すると、100 Ω-m前後の比抵抗値については、両者は比較的良く一致しているが、それより高い比抵抗を示す領域では、GEM-2による比抵抗値がOhmMapperによる値に比べて高くなっているという違いが報告されている(今村ほか, 2007)。GEM-2のような磁場のみを用いた電磁探査法は、第4図(b)に示した様に、比抵抗の小さいものへの影響には敏感であるが、比抵抗の大きなものには

鈍感であるため、逆解析法で比抵抗値を推定しても、高比抵抗の値については精度良く決定できないためではないかと考えられる。

5. おわりに

浅層地盤を対象とした物理探査法の内、マルチ周波数固定式小型ループ電磁探査法とマルチオフセット牽引式キャパシタ電極比抵抗法について、その原理と装置、および適用事例について報告した。本論で紹介したような河川堤防調査の他に、従来より適用が試みられている空洞調査、道路路面調査、不発弾調査、廃棄物の投棄や工場跡地、農業に関連した土壌・地下水汚染調査、あるいは資源としての地下水調査、帯水層への塩水浸入調査など、浅層地盤の様々な対象への物理探査法の適用が報告されている。多種多様な適用対象への事例研究を蓄積し、各探査手法がどのような対象には有効であるか、さらにはどのような改良が必要かを整理して行くことが、浅層地盤調査における物理探査適用の普及と発展を図る上で重要である。

文 献

- Butler, D.K. (2005) : Near-surface geophysics, Society of Exploration Geophysicists.
- 物理探査学会 (2000) : 物理探査適用の手引き(とくに土木分野への利用), 物理探査学会.
- 長谷川信介・島 裕雅 (1995) : キャパシタ電極を用いた浅部比抵抗マッピング法実用化のための基礎研究, 物理探査学会第92回学術講演会講演論文集, 414-417.
- 稲崎富士 (2006) : 統合物理探査による河川堤防の内部構造評価, 物理探査学会第114回学術講演会講演論文集, 234-237.
- 今村杉夫・徳丸哲義・光畑裕司・林 宏一・稲崎富士・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会 (2007) : 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討(その4)-比抵抗探査手法の比較検討-, 物理探査学会第116回学術講演会講演論文集, 120-123.
- 地盤工学会 (2005) : 地盤調査-基本と手引き-, 丸善.
- 小西千里・林 宏一・山下善弘 (2005) : 電極棒を用いない牽引式電気探査手法「オームマップパー」の適用実験と今後の展開, 応用地質技術年報, 25, 47-60.
- Kuras, O. (2002) : The capacitive resistivity technique for electrical imaging of the shallow subsurface, Ph.D. Thesis, The University of Nottingham.
- Kuras, O., Beamish, D., Meldrum, P.I. and Ogilvy, R.D. (2006) : Fundamentals of the capacitive resistivity technique, *Geophysics*, 71, G135-G152.
- 光畑裕司・内田利弘・松尾成一・大里和己・丸井敦尚・楠瀬勤一郎 (2004) : 沿岸域地下帯水層における塩水浸入領域調査のための電磁探査法の適用実験, 物理探査学会第111回学術講演会講演論文集, 225-228.
- 光畑裕司・今里武彦・内田利弘 (2007) : マルチ周波数固定式小型ループ電磁探査システムのバイアスノイズ補正の効果, 物理探査学会第116回学術講演会講演論文集, 71-74.
- Rubin, Y. and Hubbard, S.S. (2005) : *Hydrogeophysics*, Springer-Verlag.
- Sharma, P.V. (1997) : *Environmental and engineering geophysics*, Cambridge University Press.
- Shima, H., Sakashita, S. and Kobayashi, T. (1996) : Developments of non-contact data acquisition techniques in electrical and electromagnetic explorations, *Jour. Appl. Geophys.*, 35, 167-173.
- 荘司泰敬 (2006) : 簡便・迅速に地盤の可視化を行う物理探査手法, 土と基礎, 54-4, 7-9.
- Tabbagh, A., Hesse, A. and Grard, R. (1993) : Determination of electrical properties of the ground at shallow depth with an electrostatic quadrupole: field trials on archaeological sites, *Geophys. Prosp.*, 41, 579-597.
- 山下善弘・Douglas Groom・稲崎富士・谷米 晃・鈴木 徹・林 宏一 (2004) : キャパシタ電極を利用した電気探査装置 OhmMapper による浅部比抵抗探査, 物理探査学会第110回学術講演会講演論文集, 111-114.
- 渡辺文雄・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会 (2007) : 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討(その1)-河川堤防健全度評価への統合物理探査の役割とコンソーシアムの取組み-, 物理探査学会第116回学術講演会講演論文集, 277-280.

MITSUHATA Yuji and INAZAKI Tomio (2008) : Electric and electromagnetic nondestructive profiling for shallow-ground resistivity surveys.

<受付: 2007年12月3日>