

電極棒を用いない牽引式電気探査手法 「オームマッパー」の適用実験と今後の展開

小西 千里・林 宏一・山下 善弘

Field experiments and evaluation of the capacitively-coupled resistivity survey system "OhmMapper"

Chisato Konishi, Koichi Hayashi and Yoshihiro Yamashita

Abstract

Electrical survey has been used for many purposes in civil engineering, for example the underground water survey, the levee survey and the tunnel survey. In this decade, multi-channel acquisition system has been developed, however, measuring time has not reduced so much, because we can not omit setting up many electrode stakes on the ground.

Recently capacitively-coupled resistivity(CCR) survey called "OhmMapper" is developed by Geometrics, Inc. Using OhmMapper, we can measure the resistivity of the ground by towing one transmitter and some receivers. We do not have to set up electrode stakes, thus it can reduce measuring time dramatically. In our experiment, it takes only about 15 minutes to measure 1000 m survey line. And it is possible to use on asphalt pavement roads where it is difficult to set up electrode stakes. Combined survey of CCR and surface wave seismic survey shows that two results agree with each other and the combination of the two methods is useful for detail investigation. The experiment at levee shows that the CCR method is very useful for long line survey. Even though a survey line is very long, 1-D analysis using linear filter method enable us to cut-down the time for data analysis. As a result of some studies, CCR method does not have enough resolution to discriminate thin formation and does not have enough accuracy above 1 m depth. However, this method is useful and powerful tool for the purpose of taking a rough geological structure of huge survey area at an initial part of investigation.

Keywords: OhmMapper, tow resistivity survey, capacitively-coupled resistivity

(要 旨)

電気探査は、地下水調査、堤防調査やトンネル調査など多くの土木地質調査で利用されているが、その測定方法については、多チャンネル化により効率化が図られてはいるものの、地面に電極棒を打設するという作業は変わらず、これまであまり大きな進歩はみられなかった。

しかし近年、電極棒の打設を必要としないキャパシタ電極を用いた牽引式電気探査手法であるオームマッパー(Geometrics, Inc)が開発された。この手法は、従来の電気探査と違って電極棒を必要としないため、これまでの手法と比べてはるかに効率良く測定することができる。今回の現場実験によれば、1000mの測線を約15分で測定することが可能であった。また、キャパシタ電極を用いることで、アスファルト舗装された道路のように電極棒を打設するのが困難な場所においても測定が可能であることが確認できた。表面波探査との併用実験では、整合する両探査の結果から地盤構造を推定できることを示した。堤防で実施した現場実験では、長大測線における本技術の有効性が確かめられた。解析においては、リニアフィルター法を用いた連続1次元解析を用いることで、長大測線であっても短時間で十分な結果が得られることが確認できた。一方、探査深度等を検討した結果、1m以浅のような極浅層の地盤情報や、詳細な地盤情報を得るにはやや分解能が粗いことがわかった。しかしながら、概査のように広域の概略的な地盤構造を効率よく測定する目的においては、本手法は大変有効なツールであると考えられる。

キーワード: オームマッパー, 牽引式電気探査, キャパシタ電極

1. はじめに

電気探査は、地盤の比抵抗を測定することにより、比抵抗を変化させる要因となる地盤の種類や状態を間接的に推定するものである。これまで、電気探査は堤防調査における堤体構成土の判別や地盤改良効果の判定、トンネル調査における岩盤風化帯の把握、透水性の亀裂の把握など多くの土木地質調査に用いられてきた。また、地下水調査における代表的な物理探査手法として、農業土木分野や温泉調査でも数多く適用されてきた。しかしながらその測定方法については、測定器の多チャンネル化により効率化が図られてきたものの、地面に電極棒を打設するという作業は変わらず、測定には比較的多くの時間を要している。また、アスファルト舗装された道路上での測定の場合、電極棒を打設するための削孔作業が必要となる。ゲル状の電極¹⁾を利用すれば削孔の必要はないが、この場合でも多くの電極を打設することには変わりがない。

近年、防災および環境の分野などにおいて、広域な浅部地盤構造を迅速かつ経済的に探査することが求められるようになってきた。このような目的に適った探査手法として、地震探査ではランドストリーマー²⁾を用いた手法が開発されている。同様に、電気探査においてもランドストリーマーのような牽引式の電気探査が開発されている (Timofeev et al³⁾, 長谷川ほか⁴⁾)。牽引式の電気探査では、キャパシタ電極と呼ばれる電極を用いるため、地面に電極棒を打設する必要がない。したがって、これまで多くの時間を必要としていた電極打設作業が不要となり、探査効率をこれまでより飛躍的に高めることができる。さらに、アスファルト舗装の道路上でも測定が可能であるため、削孔またはゲル電極を利用することも不要となる。オームマップパーは、このように迅速な測定に大きな特徴をもつ牽引式電気探査手法のひとつとして開発されたものである。本論文では、オームマップパーの測定の原理や測定方法、電極棒を用いた従来の電気探査との比較実験、本手法の有効性、今後の課題・展望などについてまとめる。

2. オームマップパーの測定・解析方法

ここでは、まず牽引式の電気探査で利用されるキャパシタ電極の原理を説明し、次にオームマップパーのシステムについて述べる。また、従来の電気探査 (点電極を用いた場合) の見掛け比抵抗と、オームマップパー (線電極を用いた場合) の見掛け比抵抗の相違について検討する。最後に、オームマップパーの解析結果の表示方法について示す。

2. 1 キャパシタ電極の原理

キャパシタ電極を用いた電気探査としては、長谷川ほ

か⁴⁾の平板電極を用いたシステムとケーブルを用いたシステムがあり、オームマップパーは後者のケーブルを用いたシステムにあたる。ただし、基本的にキャパシタ電極の原理は同じであるため、ここでは長谷川ほか⁴⁾に示された平板電極を例にしてキャパシタ電極を説明する。

2. 1. 1 電流通電の原理 (送信側の原理)

キャパシタ電極の送信部分の概念図を示すと図-1のようになる。地盤とは絶縁された2つの平板電極に、図-1のようにそれぞれ逆の電荷を与えると、地盤付近には平板電極とは逆の電荷が集中し、平板電極と地盤との間にコンデンサーが形成される。コンデンサーが充電される間は地盤中に電荷の移動が発生するため、地盤に電流が流れる。このとき、平板電極に一定の電圧を加え続けるとコンデンサーはそれ以上充電できなくなり、電流は流れなくなる。しかし、交流電圧を加えることにより、コンデンサーが充電・放電を繰り返すことで、地盤に連続的に電流を流すことができる。

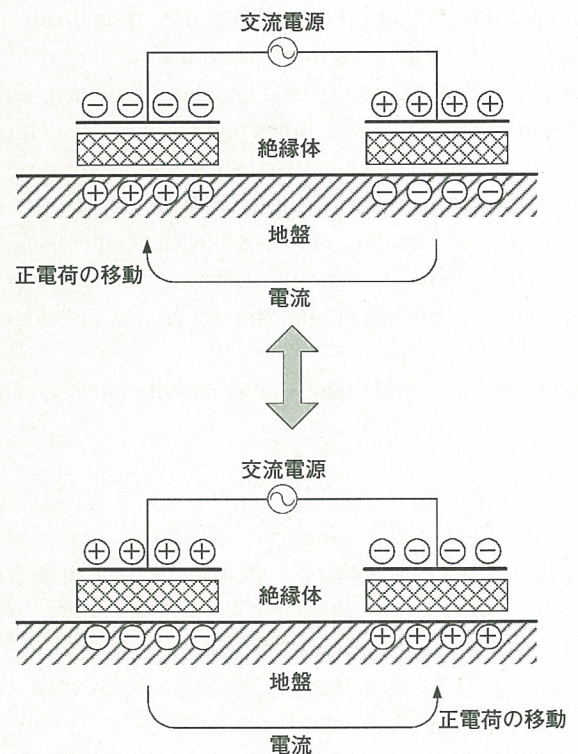


図-1 キャパシタ電極の送信部分の概念図

Fig. 1 A conceptual model of the capacitively-coupled resistivity (CCR) transmitter

次にこのキャパシタ電極を図-2のような回路でモデル化し、回路に流れる電流値について考える。実際にはコンデンサーは送信側と受信側の2つなので、図-2(上)のようなモデルと考えられる。しかしここでは、2つのコンデンサーの容量を合成してひとつのコンデンサー

で表すこととし、簡単に図-2 (下) のモデルで考える。

コンデンサーの容量 (C) は次のように(1)式で表される。

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \frac{S}{d} \dots (1)$$

ϵ_r : 比誘電率 (空気の場合1.00059)

ϵ_0 : 真空の誘電率 ($8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$)

S : 平板電極の面積

d : 平板電極の地表からの高さ

ここで、起電力 (E) および電流 (J) をそれぞれ(2), (3)式のように表すと、

$$E = E_0 e^{i\omega t} \dots (2)$$

$$J = J_0 e^{i(\omega t - \phi)} \dots (3)$$

ω : 角周波数

ϕ : 位相差

t : 時間

回路を流れる電流は(4)式のように表される。

$$J = \frac{1}{R + 1/i\omega C} E \dots (4)$$

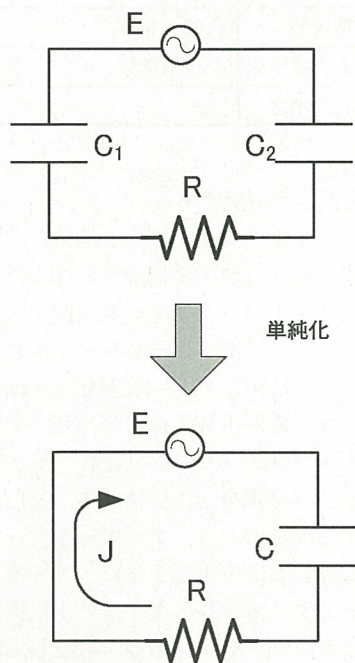


図-2 キャパシタ電極の回路モデル

Fig. 2 Equivalent circuit of capacitively-coupled electrode

R : 地盤の抵抗

たとえば、周波数が16.5kHzで、平板電極の面積を0.1 m²、平板電極の地表からの高さを0.02mとすると、コンデンサーのリアクタンス ($1/\omega C$) は、

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 S/d} \approx 10^5 \frac{1}{\epsilon_r} \dots (5)$$

となる。通常、地盤の抵抗 (R) はこの値よりも十分に小さいため無視できるとすると、(4)式より地盤を流れる電流は次のように表すことができる。

$$J \approx i\omega C E = i\omega \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d} E \dots (6)$$

すなわち、地盤の比抵抗によらずに一定の電流を地盤に流すことができる。たとえばこの例で起電力を1kVとすると、地盤に流れる電流は数mAとなり、測定可能な大きさと考えられる。

ただし、コンデンサーの容量 (C)、すなわち平板電極の地表からの高さや地表の比誘電率が変化すれば地盤に流れる電流も変化する。しかし、オームマップパーでは、地盤に流れる電流の大きさを同時に送信しているため、各測定における電流値の変化は問題とはならない。

2. 1. 2 電位受信の原理 (受信側の原理)

受信側では、2つのキャパシタ電極を用いて地盤に発生する電位差を測定している。これは2つのキャパシタ電極間に電圧計を配置したことになる。電圧計の場合、回路に流れる電流を測定して電位を求める。したがって、受信側では地盤に発生する電位差を起電力として回路に流れる電流値を測定し、電位差を測定している。

キャパシタ電極の受信部分を概念図として図-3に示す。

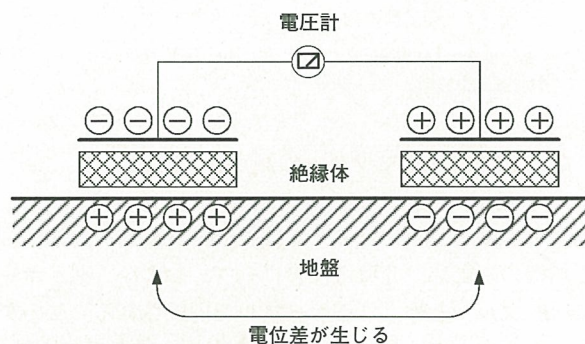


図-3 キャパシタ電極の受信部分の概念図

Fig. 3 A conceptual model of the CCR receiver

図-4に単純化した受信機の回路モデルを示す。起電力が地盤側に、回路抵抗が測定装置側にあり、ちょうど送信側の回路モデルと逆になる。このとき、回路に流れる電流値は送信側と同様に(4)式で表すことができる。ただし、 (R) が回路の内部抵抗となる。

$$J = \frac{1}{R + 1/i\omega C} E \dots (4)$$

R : 回路の内部抵抗

コンデンサーのリアクタンス ($1/i\omega C$) は(5)式で表されるが、地表条件が変化することによりリアクタンスは変化する。たとえば、平板電極と地盤までの距離 (d) が変化することによりコンデンサーの容量 (C) が変化し、リアクタンスが変化する。リアクタンスが変化すると、電圧計に流れ込む電流値が変化し、結果として得られる電圧も変化する。しかし、コンデンサーのリアクタンスは(5)式から 10^{5-6} 程度の大きさと考えられるため、電圧計の内部抵抗 (インピーダンス) をそれよりも十分に大きくしておくことにより、その影響を小さくすることができる。オームマップパーの受信機では、送信周波数における入力インピーダンスは $10M\Omega$ 以上となっており⁵⁾、コンデンサーのリアクタンスの100倍程度の大きさであるため、リアクタンスの変化による測定値の影響は数%程度と推定される。したがって、地表条件の変化により測定値は変化するものの、測定結果を劇的に変化させるものではない。

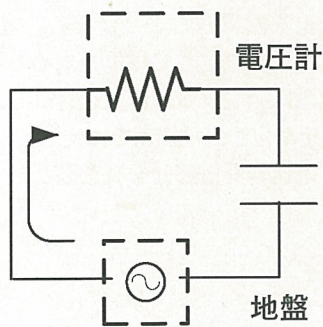


図-4 受信機の回路モデル

Fig. 4 Equivalent circuit for the CCR receiver

2. 2 オームマップパーの測定システム

オームマップパーのシステムは、データロガー、送信・受信機の制御部、非導電性のロープ、および「ダイポールケーブル」と呼ばれるケーブルで構成される。このダイポールケーブルが、キャパシタ電極の役割を果たす。オームマップパーの測定状況を写真-1に示す。オームマップパーは、測定者が人力で牽引するか、または自動車に

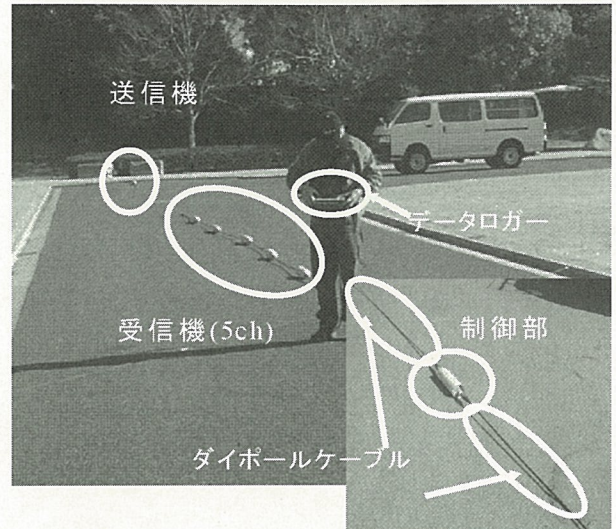


写真-1 オームマップパー測定状況

Photo 1 OhmMapper Survey

表-1 オームマップパーの主な仕様一覧

Table-1 Specification of the OhmMapper system

名称	OhmMapper (アメリカ・Geometrics社製)	
測定原理	キャパシタ電極を利用した ダイポール・ダイポール比抵抗探査	
測定レンジ	3-100,000 ohm*m	
測定間隔	最大2sample/sec	
データ容量	2MByte RAM	
ダイポールケーブルの種類	2.5, 5m	
送信機	送信周波数	16.5kHz
	最大出力	2W
	電流値	0.125-16mA
受信機	入力電圧値	0-2V RMS
	相対精度	< 3%

よる牽引でも測定が可能である。

測定時は、ダイポールケーブルと地盤との間にコンデンサーが形成され、送信・受信が行われる。ダイポールケーブルによるキャパシタ電極の概要図を図-5に示す。図-5に示すように、ダイポールケーブルとは同軸ケーブルのシールド線に16.5 kHzの交流電圧を印加するもので、このシールド線が平板電極に相当し、ケーブルの絶縁性被覆部が、コンデンサーの誘電体の働きをする。このダイポールケーブルを送信機に2本、受信機に2本それぞれ接続する。このとき、ダイポールケーブル1本が従来の電気探査における電極1本に相当する。したがって、電極配置はダイポール・ダイポール電極配置とみなすことができる。図-6に、電極を打設して行う従来の電気探査とオームマップパーによる電気探査の対応を模式図で示す。

現在、ダイポールケーブルは2種類の長さのものがあ

り、使用するダイポールケーブルの長さを変えることによりダイポール長を変化させることができる。また、送信機と受信機の間はロープなどの非導電性ケーブルで接続する。そのため、この非導電性ケーブルの長さで送受信機間距離を調整することにより、ダイポール間隔を変化させることができる。各受信機間は1本の同じダイポールケーブルで接続し、最大で5チャンネルまで接続することができる。したがって最大で同時に5深度の測定が

可能となっている。オームマッパーの機器の仕様を表-1にまとめる。

2. 3. 線電極を用いた場合の見掛比抵抗

一般に電気探査で得られる見掛比抵抗 (ρ_a) は、測定される電位差 (V) と通電した電流 (I) および電極配置係数 (K) により(7)式で求められる。

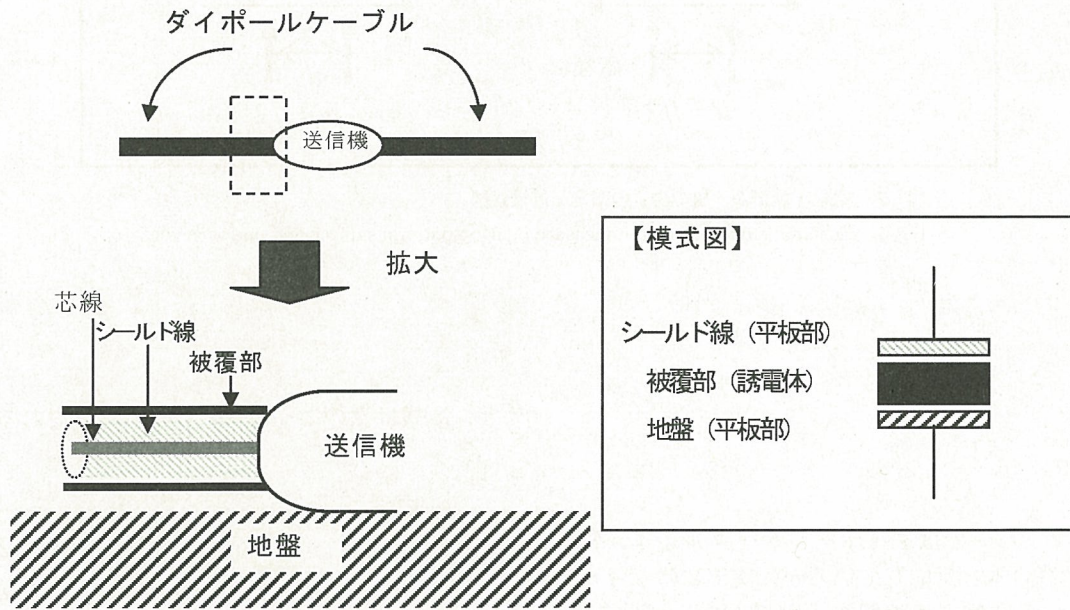


図-5 ダイポールケーブルの概要図
Fig. 5 Schematic diagram of the dipole cable

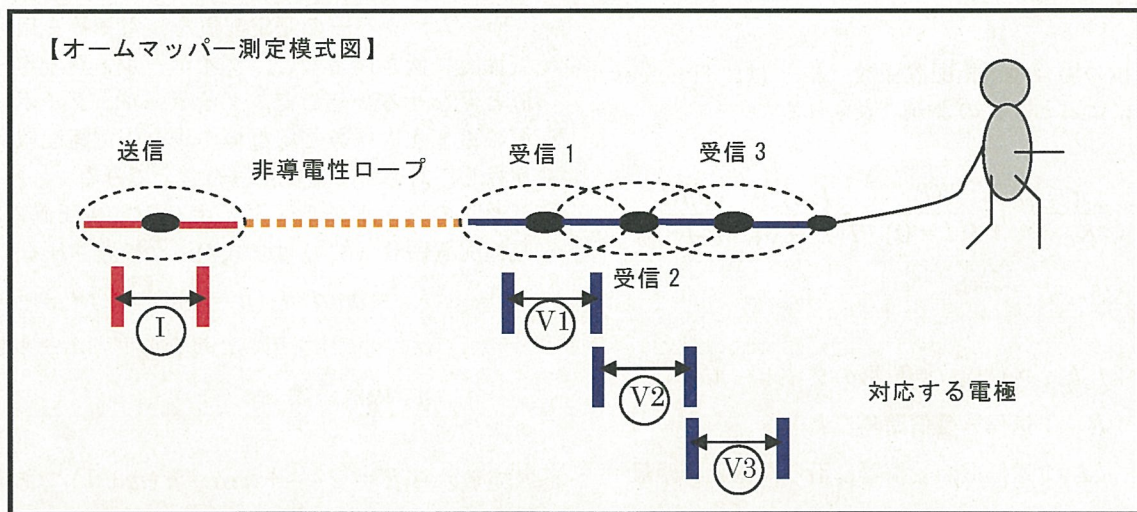


図-6 オームマッパーの測定配置と従来の電気探査の電極配置との対応
Fig. 6 Comparison of the array geometry between the OhmMapper and dipole-dipole survey.

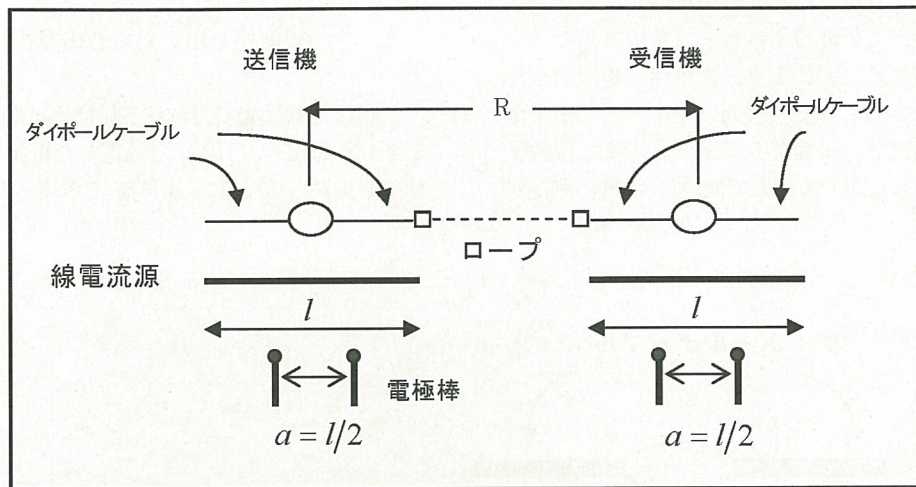


図-7 送信・受信が一组の場合の測定配置模式図
 Fig. 7 Schematic diagram of the measurement by one transmitter and one receiver

$$\rho_a = K \frac{V}{I} \dots (7)$$

オームマップではダイポールケーブル1本が電気探査の電極1本と対応しているが、実際にはダイポールケーブルは地表で線電極の配置となっている。そこで、線電極の場合の電極配置係数 (K_C) を用いることにより、オームマップの場合も同様に、各受信機のダイポールケーブル間の電位差 (V) と送信電流 (I) および電極配置係数 (K_C) により見掛け比抵抗 (ρ_a) が求められる。

図-7に送信・受信が一组の場合の測定配置模式図を示す。

線電極の場合の電極配置係数 (K_C) は、Timofeev et al.³⁾ によると(8)式のように表される。

$$\frac{\pi}{K_C} = \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \frac{I(l)}{I(l=0)} \cdot \frac{I(L)}{I(L=0)} \cdot \frac{dl dL}{(R-l+L)^3} \dots (8)$$

l, l_2 : 送信機, 受信機のダイポール長

R : 送信-受信間隔

l, L : 送信機, 受信器に沿った軸上の距離

ここで、ダイポールケーブル2本の長さを線電極のダイポール長 (l) とし、 $b = 2R/l$ と変数を定める

と、(8)式は次のように(9)式のように表される。

$$K_C = \frac{l\pi}{\ln \left[\left(\frac{b^2}{b^2-1} \right)^{2b} \left(\frac{b^2+2b}{(b+1)^2} \right)^{(b+2)} \left(\frac{b^2-2b}{(b-1)^2} \right)^{(b-2)} \right]} \dots (9)$$

$$b = \frac{2R}{l}$$

R : 線電極のダイポール中点間の距離

オームマップの測定配置を、電極棒を用いた電気探査に置き換えると、ダイポール・ダイポール配置と見なせる。そこで、ダイポール・ダイポール配置の電極配置係数と線電極の場合の電極配置係数を比較し、対応する電極位置を考えてみる。

通常のダイポール・ダイポール電極配置の場合、電極配置係数 (K_G) は(10)式のように表される⁶⁾。

$$K_G = \pi \cdot a \cdot n \cdot (n+1)(n+2) \dots (10)$$

a : 電極棒を用いた場合のダイポール長

n : 隔離係数

定義から $R = 2 \cdot \frac{a}{2} + n \cdot a = a(n+1)$ であるから、

$$n = \frac{R}{a} - 1 \text{ となる。したがって、}$$

$$K_G = \pi R \left(\frac{R}{a} + 1 \right) \left(\frac{R}{a} - 1 \right) = \pi R \left[\left(\frac{R}{a} \right)^2 - 1 \right]$$

・・・(11)

$$a = l/2 \text{ とすると } K_G = \pi R \left[\left(\frac{R}{l/2} \right)^2 - 1 \right] \text{ ・・・(12)}$$

となる。

このようにして得られた K_G と K_C を比較すると表-2 のようになり、線電極のダイポール中点間の距離 R とダイポール長 l との比が大きいほど、電極配置係数が等しい数字に近づくことになる。 R/l の値が1の場合は、両者の値に大きな違いが見られるが、通常の測定では非導電性ロープの長さを最低でもダイポール長程度とるため、 R/l が1となるような測定配置は考えなくても良い。

電極配置係数がほぼ同じになるということは、オームマップパーで用いる線電極の場合の測定配置と、線電極の長さの半分の位置に点電極を配置した場合の測定を等価と考えてよいということに相当する。したがって、オームマップパーの測定を点電極の電極配置とみなすことで、線電極であっても点電極として考えた解析を行うことができる。

表-2 電極配置係数の比較

Table-2 Comparison of the geometric factor

R/l	K_C/l	K_G/l	K_G/K_C
1	4.623	9.425	2.039
2	87.73	94.25	1.074
3	320.3	329.9	1.030
4	779.0	791.7	1.016
8	6384	6409	1.004

2. 4 解析結果の表示

オームマップパーの解析結果は、各距離程で得られた深度ごとの見掛比抵抗を見掛比抵抗擬似断面図として表示するか、あるいは従来の電気探査と同様に、逆解析により求められる地盤の比抵抗モデルを解析深度断面図として表示する。地盤構造が単純でない場合には、見掛比抵抗擬似断面図は地盤構造を反映してはいるものの、実際の比抵抗分布とは異なることが多い。したがって、見掛比抵抗擬似断面図から地盤構造を推定する場合には注意

が必要である。

一方、逆解析により地盤の比抵抗モデルを求める場合は、前述のように線電極をある代表点における点電極とみなすことで、従来の電気探査と同様に解析することができる。

電気探査の逆解析では有限要素法を用いた2次元のモデリングが用いられることが多い。しかし、有限要素法には比較的多くの計算時間を必要とするため、迅速性を求めるオームマップパーの解析には必ずしも適当ではない。むしろ、オームマップパーの解析では、地盤を水平多層構造と仮定した1次元の解析を行うリニアフィルター法⁷⁾を用いて、連続1次元解析により地盤比抵抗モデルを推定する方法の方が有効と考えられる。

3. 現場実験

3. 1 実験内容

オームマップパーの現場への適用性を確認するために、いくつかの現場実験を実施した⁸⁾。実施した現場適用実験の目的と内容を表-3にまとめる。(1)の実験では、20~50 $\Omega \cdot m$ 程度の比抵抗値を持つ粘性土でのオームマップパーの適用性を検討した。比較データとして、従来型の電極を打設した2極法の比抵抗探査を行った。(2)の実験では、同じ測線で実施した表面波探査の結果とオームマップパーの結果を比較した。(3)の実験では、舗装道路上での適用性を検討した。(4)の実験では、河川堤防上を縦断するような比較的長い測線へのオームマップパーの適用性を検討した。

3. 2 実験結果

3. 2. 1 実験(1)の結果

一般に電気探査では、地盤の比抵抗が低い場合には得られる信号(電位)が小さいために、探査が難しくなる。そこで、比抵抗が低く探査が難しい粘性土の地盤において、最も一般的な2極法電気探査の結果と比較し、オームマップパーの適用性を確認する。

テストフィールドにおけるオームマップパーと2極法電気探査の結果を図-8に示す。なお、図-8には逆解析を行った後の比抵抗モデルの解析結果断面図を示した。解析には、オームマップパーのデータについてはGeotomo Software社製Res2DInv、2極法のデータについては応用地質(株)製ElecImagerを用いた。オームマップパーでは、ダイポールケーブル長を5mとし、最小ダイポール間隔を5m、最大ダイポール間隔を35mとして測定を行った。また2極法電気探査では、最小電極間隔1mで15深度まで測定を行った。

図-8より、本テストフィールドでの大局的な比抵抗構造は、深度約3mまでが140 $\Omega \cdot m$ 程度以上の高比抵抗

表-3 現場適用実験の目的と内容

Table-3 The objects and details of the field experiments

実験箇所	実験(1) (応用地質(株)テストフィールド)	実験(2) (応用地質(株)テストフィールド)	実験(3) (応用地質(株)テストフィールド)	実験(4) (河川堤防)
実験目的	<ul style="list-style-type: none"> 従来の電極打設型手法との比較 粘性土地盤での適用性確認 	<ul style="list-style-type: none"> 表面波探査との比較 既存ボーリング資料との比較 	<ul style="list-style-type: none"> 舗装道路上での適用性確認 	<ul style="list-style-type: none"> 長大測線への適用性評価 従来の電極打設型手法との比較 2次元解析と1次元解析の比較
実験内容	<ul style="list-style-type: none"> OhmMapperによる探査 ダイポールケーブル長:5m 最小ダイポール間隔:5m 最大ダイポール間隔:35m 2極法電気探査(pole-pole法) 電極間隔:1m 15深度 	<ul style="list-style-type: none"> OhmMapperによる探査 ダイポールケーブル長:2.5m 最小ダイポール間隔:2.5m 最大ダイポール間隔:20m 高精度表面波探査 受振器間隔:1m 起震点間隔:2m 	<ul style="list-style-type: none"> OhmMapperによる探査 ダイポールケーブル長:2.5m 最小ダイポール間隔:5m 最大ダイポール間隔:20m 	<ul style="list-style-type: none"> OhmMapperによる探査 ダイポールケーブル長:5m 最小ダイポール間隔:5m 最大ダイポール間隔:35m 2極法電気探査(pole-pole法) 電極間隔:1m 15深度
測線長	257m	75m	125m	1200m (2極法は250m)
地表条件	植生あり	植生あり	舗装道路	舗装道路

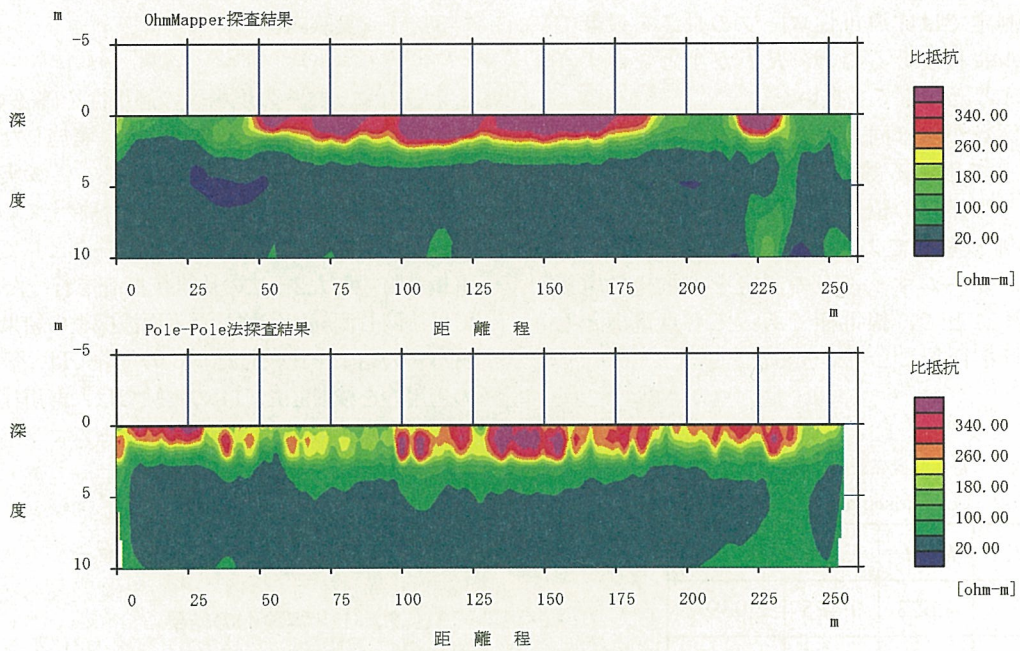


図-8 実験(1)の探査結果 (上)OhmMapperによる探査結果 (下)2極法比抵抗探査による探査結果

Fig. 8 Results of survey(1) (top)CCR survey (bottom) pole-pole survey

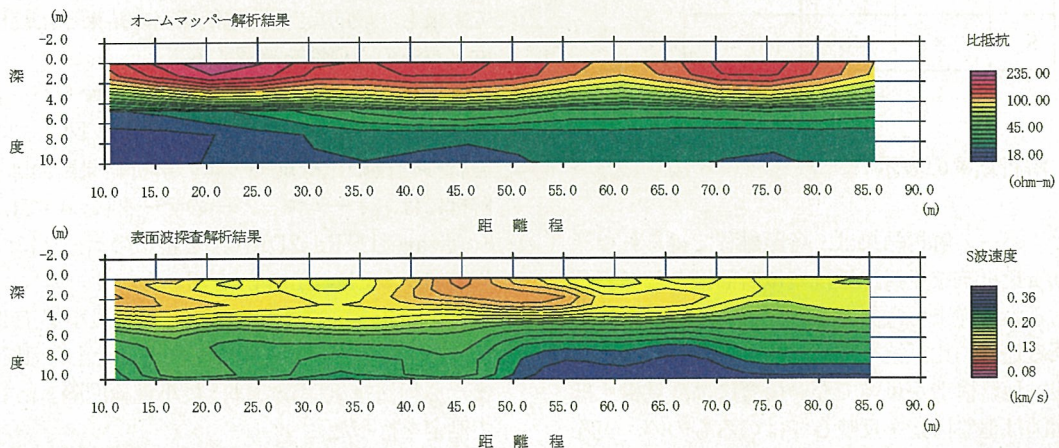


図-9 実験(2)の探査結果 (上)OhmMapperによる探査結果 (下)表面波探査による探査結果

Fig. 9 Results of survey(2) (top) CCR survey (bottom) surface wave seismic survey

抗を示し、その下部は $60\Omega\cdot\text{m}$ 程度以下の低比抵抗部となっていることがわかる。両手法の結果を比較すると、オームマップパーの探査結果と従来の2極法電気探査の結果は、大局的にはよい整合を示しているといえる。このことから粘性土地盤のような低比抵抗の地盤でも十分に適用が可能であることがわかる。

地表近くの詳細な構造は両者の間で違いが見られる。これは解析ソフトウェアの相違が影響している可能性もある。また、電極配置や電極間隔の違いも影響を及ぼしているのではないかと考えられる。

作業性については、本実験では250 mの測線を人力で牽引し、ダイポール間隔を変えて2往復の測定を行ったが(総測定延長1000 m)、測定時間は15分程度であった。

3. 2. 2 実験(2)の結果

実験(2)のオームマップパーでは、ダイポールケーブル長を2.5mとし、最小ダイポール間隔を2.5m、最大ダイポール間隔を20mとして測定を行った。同測線で行った高精度表面波探査は、受振器間隔を1 m、起振間隔を2 mとして測定を行った。両手法の探査結果を図-9に示す。

オームマップパーの結果は、深度2 m程度までが $100\Omega\cdot\text{m}$ 以上の高比抵抗を示し、2~4 mまでが $30\sim 100\Omega\cdot\text{m}$ 程度のやや低比抵抗、その下部は $30\Omega\cdot\text{m}$ 以下の低比抵抗となっている。表面波探査の結果は、深度約4 mまでが 180m/s 以下のS波速度を示し、その下部はやや大きいS波速度となっている。測線後半は 300m/s 以上のS波速度が大きい部分が見られる。

測線位置から数10m離れた位置にあるボーリング孔の土質柱状図(図-10)によると、地表から深度3 m程度までが、礫混じりロームおよび細砂、深度3 m~5 mに凝灰質粘土が分布している。凝灰質粘土の下部は、砂質シルト~細砂となり、砂質部が多くなるということがわかってい。また、本測線位置は埋め戻し土が表層に分布していることがわかってい。

オームマップパーと表面波探査の結果では、ともに深度

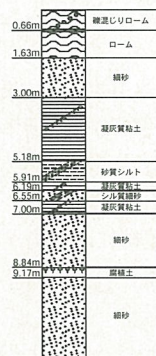


図-10 土質柱状図(参考)

Fig. 10 Geologic column

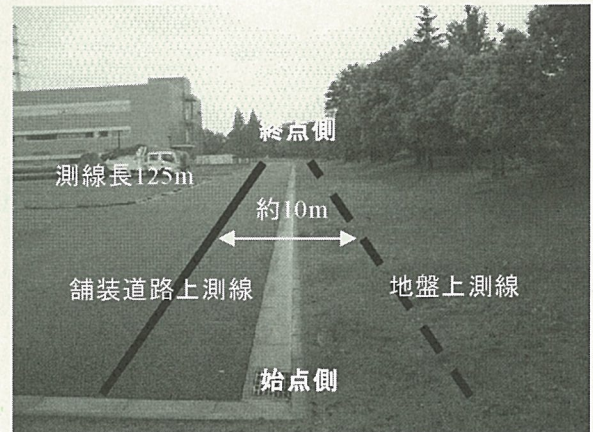


写真-2 舗装道路と地盤の比較測線配置

Photo 2 The survey line on the asphalt pavement (left) and on the grass(right).

4 m付近に明瞭な境界がみられる。深度4 mより下部ではS波速度が大きく、砂質部と考えられる。一方、オームマップパーの結果では、深度4 mより下部で低比抵抗となり、砂質部分と考えると矛盾するが、地下水位以下であるため十分に飽和していると考えれば低比抵抗となり、この結果を説明できる。したがって、深度4 mの境界は、凝灰質粘土と砂質部の境界を示していると思われる。深度4 mより上部では、S波速度には大きな違いは見られない。これは、埋め戻し土のため、全体的に地盤が緩んでいるためと考えられる。一方、オームマップパーの結果では、深度2 m~4 mがやや低比抵抗となっており、この区間が凝灰質粘土に相当すると思われる。また、深度2 mより上部では高比抵抗となる部分が見られる。これは、埋め戻し土の中に礫質部分が多くなっていることによる違いと考えられる。このように、表面波探査から得られるS波速度とオームマップパーから得られる比抵抗をあわせて解釈することで、地盤の状況をより詳細に推定することができる。

3. 2. 3 実験(3)の結果

舗装道路上での実験では、舗装道路上での測線と、約10 mオフセットした箇所での舗装道路上の測線と平行に引いた地盤上(芝生上)での測定結果を比較した。測線状況を写真-2に示す。本測線の舗装と路床の厚さは55~80cmで、始点から距離程約40m付近までが55cmで、以降の距離程で80cmとなっている。舗装道路上での探査実験結果を図-11に示す。図-11では、ダイポールケーブル長2.5 m、最小ダイポール間隔5 m、最大ダイポール間隔20 mとした場合の舗装道路上での測定と地盤上での測定結果を見掛比抵抗擬似断面図として示した。なお、ここでは縦軸は隔離係数を表している。

図-11より、地表条件が舗装道路でも、地盤上での測定と遜色のない良好なデータが得られており、舗装道路上でも適用可能であることが確認できた。

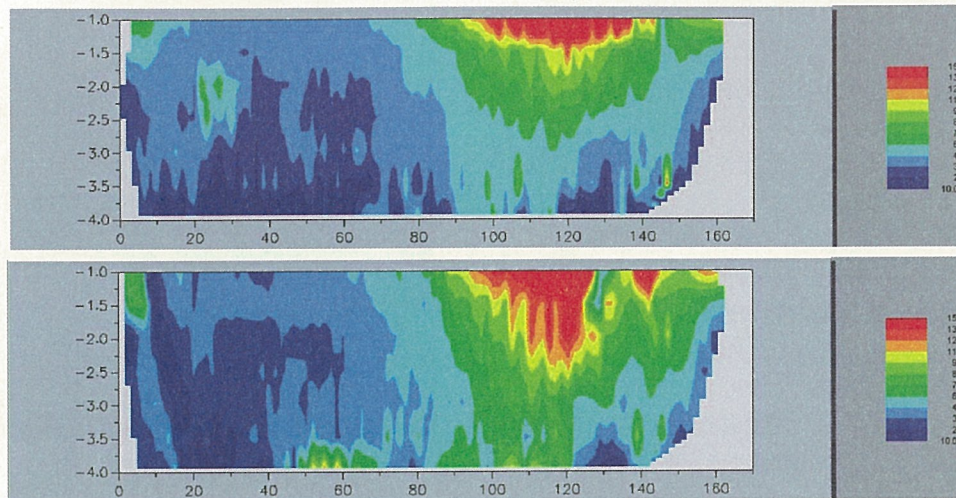


図-11 実験(3)の結果 (舗装道路上での探査実験結果)

(上)地盤上測定での見掛け比抵抗擬似断面図 (下)舗装道路上測定での見掛け比抵抗擬似断面図

Fig. 11 Results of survey(3) (top) on the grass (bottom) on the asphalt pavement

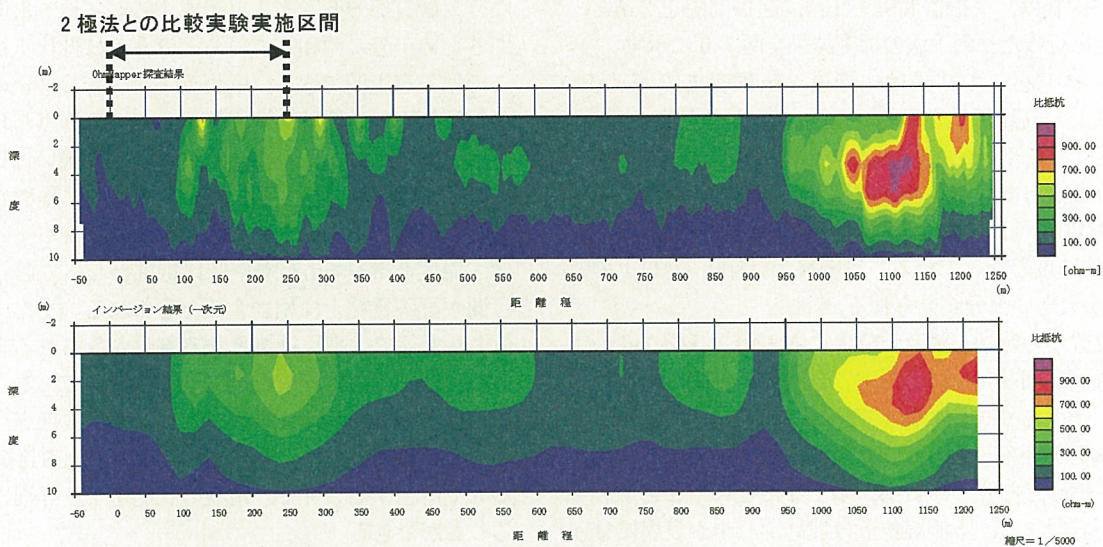


図-12 実験(4)の結果 (河川堤防でのOhmmapperによる探査結果)

(上) 2次元解析結果 (下) 連続1次元解析結果

Fig. 12 Results of survey(4) the CCR survey at the levee (top) 2-D inversion (bottom) 1-D inversion

3. 2. 4 実験(4)の結果

今回実験を行った河川堤防の測線長は1200 mで、地表条件は舗装道路である。ダイポールケーブル長は5 m、最小ダイポール間隔5 m、最大ダイポール間隔35 mである。比較のため、測線距離0-250 mの範囲で2極法比抵抗探査を、最小電極間隔1 mで15深度までの測定を行った。

オームマッパーの探査結果を図-12に示す。オームマッパーの解析は、Res2DInvによる2次元の逆解析とリニアフィルター法を用いた連続1次元逆解析を実施した。図-12に示すとおり、2次元の逆解析結果と1次元の逆

解析結果は、大局的には同等な結果が得られることがわかった。1200mの測線の場合、逆解析に必要な計算時間は、2次元解析では数時間程度必要であったが、連続1次元解析であれば数十秒で終了した。この程度の計算時間であれば、測定終了後に現場でデータを確認することができるため、詳細調査の前に行う調査として大変有効であると思われる。

本実験範囲では1000 $\Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗を示す箇所も見られたが、このような高比抵抗の箇所では電位の大きなデータを取得できた。

2極法比抵抗探査結果と比較した図を図-13に示す。

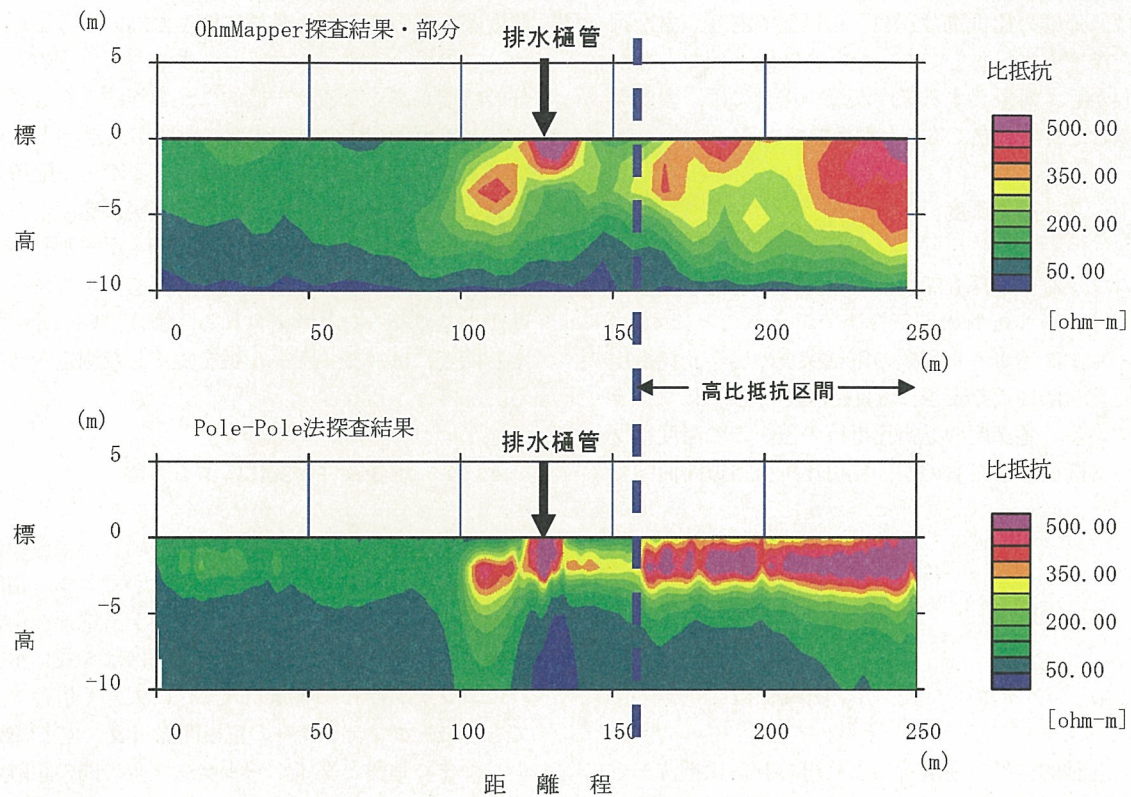


図-13 河川堤防上での探査結果 (距離程0-250mを表示)
 (上) OhmMapper探査結果 (下) 2極法比抵抗探査結果
 Fig. 13 A part of the result at the levee (0-250m)
 (top)CCR survey (bottom) pole-pole survey

測線後半部で深度方向の結果の相違がみられるものの、大局的には整合する結果が得られた。特に、高比抵抗区間が現れる境界は両結果ともに距離程160m付近であり、水平方向の区間評価という目的に対しては、従来の電気探査と同等の評価ができると思われる。

堤防上での測定では、自動車でダイポールケーブルを牽引して測定を行った。本実験では、ダイポール間隔を変化させて1200 mの測線を2往復して測定を行ったが(総測線延長4800 m)、測定時間は75分程度であった。自動車を利用した場合でも、測定時の速度は同じであり、1 kmの測定にかかる時間はおよそ15分である。従来の電極打設をともなう電気探査を1000m実施するためには、少なくとも2日は必要であることを考えると、オームマッパーの探査効率が従来と比べて飛躍的に優れていることがわかる。

4. 考察

現場適用実験を通して得られた知見をもとに、探査深度と地表条件の変化に関する検討を行った。またオームマッパーに類似する手法と比較し、オームマッパーの特

徴についてまとめる。

4. 1 深度に関する検討

4. 1. 1 表皮深度

オームマッパーは電磁法ではないが、交流電流を使用しているため、表皮深度を考慮する必要がある。表皮深度とは、地盤に透入した電磁波の強度が入射時の $1/e$ (約37%)に減衰する深度と定義され、電磁法探査では探査深度の目安とされている。周波数が高いほど、または地盤の比抵抗が低いほど信号の減衰が大きくなり、深い深度まで信号が届かないため表皮深度は小さくなる。表皮深度 (Z_d) は以下のように(13)式で求められる⁹⁾。

$$Z_d \approx 503 \sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \dots (13)$$

ρ_a : 地盤の見掛比抵抗, f : 周波数
 オームマッパーで用いている周波数は16.5kHzであり、

地盤の比抵抗を $100\Omega \cdot m$ とすると、表皮深度は39m、地盤の比抵抗を $10\Omega \cdot m$ とすると12m程度となる。今回の実験では、地盤の比抵抗は $10\Omega \cdot m$ 以上であり、また対象とした深度も10mまでであったため問題とはならなかった。しかし、対象とする深度が深い場合には、表皮深度を考慮した計画を立てることが必要である。

4. 1. 2 探査深度

オームマップの探査深度については、等価なダイポール・ダイポール配置の電気探査で考えることにする。ダイポール・ダイポール配置の電気探査の場合、見掛比抵抗は便宜的に(14)式で表される見掛深度 (Z) にプロットされている。各深度の見掛比抵抗の値をこの深度にプロットして断面としたものが、見掛比抵抗擬似断面図である。

$$Z = \frac{a(n+1)}{2} \quad \dots (14)$$

a : ダイポール長, n : 隔離係数

しかし経験的には、逆解析により得られる比抵抗モデルは、見掛比抵抗擬似断面図で得られる構造よりも浅い構造を反映している。そのため、通常の電気探査では、対象とする深度の1.5倍の探査深度まで測定を行っている。また、深度が深くなるほど測定精度が悪くなるため、オームマップの探査深度としてはダイポール長と最大の隔離係数で決まる最大の見掛深度 (Z) のおおよそ半分程度と考えている。

探査深度 \approx (最大見掛深度) $\times 0.5$

次に、浅部の感度について考える。オームマップの測定において、たとえば2.5mのダイポールケーブルでロープ長を2.5mとしたときの隔離係数は、対応する電極棒の位置から2となることわかる (図-6参照)。このとき、見掛の深度 (Z) は3.75mとなり、探査深度としては約1.8m程度となる。一方、2極法の探査深度は、お

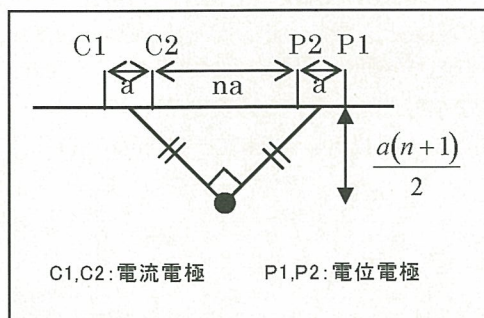


図-14 ダイポール・ダイポール配置の見掛深度
Fig. 14 Pseudo depth for dipole-dipole array

よそ電極間隔と等しいと考えられている¹⁰⁾ので、電極間隔が1mの時の探査深度は1mである。最小となる探査深度が小さいほうが、浅部に感度が高いと考えられるため、この場合、オームマップよりも2極法の方が表層部の感度が高くなる。一般的に、2極法よりもダイポール・ダイポール法の方が浅部に感度が大きい¹¹⁾といわれている。したがってダイポール・ダイポール配置と等価と見なせるオームマップの方が表層に感度があるように思われるが、今回の実験では、ダイポール長が最小でも2.5mであるため、ごく浅部については2極法よりも感度が小さくなったと考えられる。より浅い部分を対象とする探査には、ダイポール長を短くした測定が必要である。

4. 2 地表条件の変化による影響

電極棒を用いた従来の電気探査の場合、電極の接地抵抗が大きいと地盤に電流を流すことができず、精度のよい測定が困難になる。一方、キャパシタ電極を用いた場合の送信側の電流の大きさは、単純には(6)式に示したようにコンデンサーの容量 (C) に大きく依存する。中でも特に、コンデンサーの電極間隔 (d) の影響が大きい。つまり地盤とダイポールケーブルの間の距離が大きくなるほど流れる電流値が小さくなり、精度のよい測定が困難となる。測定時に時折スパイク状のノイズが現れるのは、地表に凸凹がありケーブルが弾んで地面から離れ、流れる電流が小さくなっていることが原因と考えられる。したがって、測定時にはケーブルが極端に地面から離れないようにすることが重要である。

$$J \approx i\omega CE = i\omega \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d} E \quad \dots (6)$$

キャパシタ電極を用いた受信側が受ける地表条件の影響としては2章で述べたとおり、コンデンサーの容量 (C) の変化による影響があるが、受信機内部のインピーダンスを大きくすることでその影響を小さくしている。しかしながら、送信側と同様に、測定時はケーブルが極端に地面から離れないように注意が必要である。

4. 3 他の手法との比較

オームマップと同様にキャパシタ電極を利用した電気探査手法としてIRIS InstrumentsのCORIM¹²⁾ (またはErathGraph CAP6¹³⁾)がある。CORIMは平板電極を利用するもので、電極配置は、図-15に示すように電流電極一対および電位電極一対が横にならんだ相向型配置となっている。相向型電極配置の場合、測定装置をコンパクトにでき、浅部を細かく探査する場合に適してい

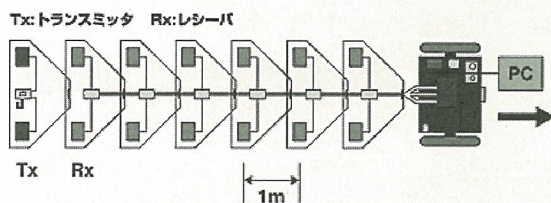
図-15 CORIMシステムの電極配置図¹²⁾

Fig. 15 Array geometry of the CORIM system

る。しかし逆に、10m程度とやや深い深度を対象とした場合には、現在の仕様では探査できない。また、平板電極が設置されるカーペット部分が比較的大きいため、牽引に小型の自動車のようなものが必要となるため機動性に難がある上、地表面の凸凹の影響を受けやすいという欠点がある。

一方、オームマッパーは、ダイポールケーブルをキャパシタ電極とし、電極配置はダイポール・ダイポール配置に相当する。オームマッパーは、ケーブルを直列に連結する構造であり、ケーブル同士を繋いでいる非導電性のロープの長さを変えることで、探査深度を大きくすることができる。したがってCORIMを用いた場合よりも探査深度を大きくすることができる。また、キャパシタ電極として利用しているダイポールケーブルが細いため、地盤の凹凸の影響を比較的受けにくい。また、ダイポールケーブルは軽量であり、人力での牽引も容易で、機動性がよい。したがって、現場での作業性の良さではオームマッパーの方が優れており、極浅層を対象とする場合以外はオームマッパーを適用する方が望ましい。

オームマッパーと同様に、浅部の比抵抗構造を簡便に調査する手法として、スリングラムEM探査と呼ばれる電磁探査手法が知られている。この手法は、電磁誘導を利用して地盤の導電率を測定するものである。測定者は地面から離れた場所でコイルに電流を流し一次電磁場を発生させ、地盤で誘導される二次電磁場を離れた場所にあるコイルで受信する。この送信コイルと受信コイルの間隔を変えることで、探査深度を変化させることができ、ロープ長を変えることにより探査深度を変化させるオームマッパーと類似している。しかし、電磁法は地盤の導電率を求めるものであり、地盤の導電率が高い（低比抵抗）場合に得られる信号が大きい。一方、オームマッパーは地盤の比抵抗を求めているため、地盤の比抵抗が高い（低導電率）場合に得られる信号が大きいという違いがある。これは、粘性土地盤のような低比抵抗地盤では電磁法が優れているということを示唆している。しかし、今回の現場実験により、比較的比抵抗が低い地盤においてもオームマッパーの適用性が確認できた。したがって、極端に低比抵抗の場合を除いて、粘性土地盤においてもオームマッパーが適用可能といえる。

5. まとめと今後の展望

電極棒を必要としないキャパシタ電極を用いた電気探査法であるオームマッパーの原理と測定・解析方法についてまとめ、現場実験により本手法の有効性を確認した。その結果、探査深度10m程度であれば、オームマッパーで得られる結果は大局的には、従来の電気探査で得られる結果と同等であることがわかった。また、アスファルト舗装した道路上での測定も可能であることが確認できた。探査効率では、測定にかかる時間は1000mの測線でも15分程度であり、従来の電気探査と比較すると飛躍的に優れていることがわかった。解析には、従来の電気探査で用いられる2次元の有限要素法を用いた逆解析を利用することも可能であるが、測線が長い場合には効率性を重視して、リアフィルタを用いた連続1次元解析を利用した。その結果、連続1次元解析でも十分な結果が得られることがわかった。ただし、この場合地形補正等は考慮されていないため、地形が複雑な場合や水平多層構造の仮定ができないような場合には2次元解析を行う必要がある。

浅部の詳細な比抵抗構造については、2極法の結果とは対応しない部分が見られた。その理由としては、電極配置の違いもあるが、ダイポール長の違いも影響していると思われる。したがって、1m程度のごく浅層の比抵抗構造はオームマッパーでは把握できないことも考えられる。このようなごく浅層だけを対象とする場合には、電極間隔を小さくできる従来の電気探査を実施するか、またはオームマッパーよりも浅層に感度をもつと思われるCORIMやスリングラムEM探査を利用するほうがよい場合もある。ただし、これらは調査対象に応じて使い分けることが肝心である。

オームマッパーの特長は、大局的な構造を迅速に探査できることである。したがって、このような特長を生かした概査として、例えば今回実験を行った堤防のように、長い測線を対象とする調査には大変有効である。堤防調査の場合には、堤体の構成土質を把握することが求められるが、オームマッパーを用いることで、定性的ではあるが区間ごとに土質を推定することが可能と考えられる。オームマッパーによる概査を実施した後、防災上の危険ポイントを抽出し、他の手法やボーリングのような精査を実施することが理想的な使用方法と考える。また、オームマッパー単独では定性的な結果になってしまうため、結果を解釈するためのボーリングや室内試験、検層をあわせて行うことにより探査結果を工学的に解釈できる。そうすることで、空間的に拡がりをもつ物理探査結果をさらに有効に利用することが可能となる。

電気探査で得られる地盤の比抵抗は、地盤の構成土質（岩石）や様々な状態（飽和度、間隙率など）を反映してはいるものの、それらが複雑に影響しあっているがために、解釈が難しいことが多い。今後はこのように複雑な地盤の比抵抗を飽和度や間隙率といった工学量として定

量的に評価できることが重要である。その際には、繰り返し調査（モニタリング調査）による地盤状態の検出が有効と考えられている¹⁴⁾。オームマップは、分解能の面では従来の電気探査よりもやや劣るが、簡便でコストを抑えた測定ができるため、対象によっては、モニタリング調査への適用も可能と考えている。また今後は、オームマップと同様に簡便に測定が可能な表面波探査と組み合わせて、S波速度と比抵抗の関係のモデル化による地盤の推定などを行っていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 櫻井健, 利岡徹馬, 小林由和, 吉川和宏 (2000) : 新しい無分極電極の開発 - 軽量で経済的なゲル状電極 -, 物理探査学会第102回学術講演会論文集, pp. 280~283.
- 2) 稲崎富士(1998) : 「ランドストリーマー」を用いた都市域での高分解能S波反射法探査, 物理探査学会第98回学術講演会論文集, pp. 114~117.
- 3) Timofeev V.M., Rogozinski, A.W., Hunter, J.A. and Douma, M. (1994) : A new ground resistivity method for engineering and environmental geophysics, Proceedings of the SAGEEP, EEGS, pp. 701~715.
- 4) 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回学術講演会論文集, pp. 414~417.
- 5) Geometrics.(2001) : OhmMapper TR-1 Operation Manual. Geometrics. Inc. , San Jose,CA.
- 6) 物理探査ハンドブック (1998) : 第5章 電気探査, 物理探査学会.
- 7) D.J.O'Neill and N.P. Merrick(1984) : A digital linear filter for resistivity sounding with a generalized electrode array, Geophysical Prospecting 32, pp. 105~123.
- 8) 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回学術講演会論文集, pp. 111~114.
- 9) 物理探査ハンドブック (1998) : 第6章 電磁探査, 物理探査学会.
- 10) 島裕雅 (1995) : 比抵抗映像法, 古今書院.
- 11) 高倉伸一 (1999) : 二次元探査に用いる各種電極配置の特性とその評価, 物理探査, 第52巻, 第5号, pp. 409~420.
- 12) IRIS Instruments, CORIM brochure, France.
- 13) 利岡徹馬, 小林剛, 勝山明雄 (1997) : キャパシタ電極を用いた浅部比抵抗探査システムの開発と河川堤防調査適用例, 日本応用地質学会平成9年度研究発表会論文集, pp. 173~176.
- 14) 高倉伸一 (1999) : 電気探査法による盛土中の水飽和度モニタリング, 物理探査学会第100回学術講演会論文集, pp. 246~250.