

# フィールドの特性や探査の目的に応じた電気探査システムの開発

高倉伸一 (産業技術総合研究所)

## Development of electrical exploration systems suitable for the purpose and situation of investigation

Shinichi Takakura (Geological Survey of Japan, AIST),

### Abstract

The electrical prospecting which investigates a subsurface resistivity distribution is used for many fields. Because the range of resistivity of rocks and soils is dramatically wide, the electrical prospecting is helpful to discrimination of a stratum or a rock mass. When the resistivity of the survey area is high, it is required to use electrical survey equipment with high voltage since contact resistance is generally high. On the other hand, using the equipment which can send large electric current is required for a low resistivity area, since the measured electric potential is low. Thus, equipment suitable for the survey area is required in order to perform electrical prospecting effectively. Selection of electrode arrays is also important since exploration depth and resolution change with the purposes of investigation. If survey line length and electrode arrangement are about the same, the dipole-dipole array gives the highest resolution and the pole-pole array gives the largest exploration depth generally. However, restrictions of the survey area or the limitation of the capacity of electrical survey equipment may make use of some arrays difficult. I have developed some electrical survey systems suitable for the characteristic of each survey area if needed. I have also chosen the investigating method which suits the survey purpose as much as possible. This paper reports some of those case studies.

### 1. はじめに

地下の比抵抗分布を求める電気探査は多くの分野に用いられている。その理由の一つは、岩石や土壌が示す比抵抗の範囲が広いので、地層の識別に役に立つからである。緻密な岩石や乾いた砂では10,000Ωmを超えることがあり、塩水を含む土壌や粘土は数Ωm以下のものがある。

しかし、値の変化が大きいため、精密な測定するためには、測定方法の選択が重要となる。たとえば、火山や地熱地域では、一般に溶岩地帯の比抵抗は高く、変質帯の平抵抗は低い。比抵抗が高い場所では、印荷電圧の高い電気探査装置が必要である。一方、比抵抗が低い場所では測定電位が小さくなるので、大電流を流す装置が必要となる。特にノイズが大きい場所では、大電流が必要となる。電気探査を効果的に行うためには、フィールドの特性に適した装置を選ぶことが望まれる。

また、探査の目的によって必要とされる探査深度や分解能が異なるので、電極配置の選択も重要と

なる。測線長や電極配置が同じであれば、一般にダイポール・ダイポール配置は分解能が高く、ポール・ポール配置（2極法配置）は探査深度が大きい。しかし、調査地の制約や探査装置の限界から、これらの配置が適用できない場合もある。

このような背景から、フィールドの特性や探査の目的に合致した電気探査システムの設計・開発を行ってきた。ここでは、それらの事例のいくつかを紹介する。

## 2. 大地の比抵抗と代表的な電極配置の探査深度

電気探査で測定される電位は、送信電流の強さと大地の比抵抗に比例する。つまり、比抵抗が 1/10 になれば、同じ精度で電位を測定するためには、10 倍の電流を送信する必要がある。大きな電流を流すため、大出力送信機を組み合わせることができる電気探査装置はいくつかある。しかし、大出力送信機は一般に高価であり、大型電源の準備やフィールドへの搬入などの作業が増えるので、探査のコストが増大する。また、近年の電気探査では 2 次元探査が一般的であり、最近では 3 次元探査も増えてきた。このような探査では、自動測定のできる装置の使用が有効であるが、出力や耐電流・耐電圧の制約から、1A を越えるような大電流を送信できる装置は少なく、市販されている装置では送信電流の最大値が 200~400mA 程度のもが多い。

10Ωm の大地に対して、200mA を流した場合の代表的な電極配置の探査深度の目安を Fig.1 に示す。ここで、探査深度の目安は、電流電極と電位電極の最も近い距離とした。経験的ではあるが、測定電位が約 1mV 以下になると、データの S/N は低下することが多いので、その値を現実的な測定限界と考える。この図より、a=3m のダイポール・ダイポール配置では探査深度が 10m 程度しかないことがわかる。探査深度を大きくするためには、電極間隔 a の大きなウェンナー配置やエルトラン配置やダイポール・ダイポール配置、もしくはポール・ポール配置を使用する必要がある。探査深度が 50m を超えるような調査では、ウェンナー配置やポール・ポール配置が現実的である。

Fig.2 は、20,000Ωm の大地に対して、10mA を流した場合の代表的な電極配置の探査深度の目安を示す。最小電極間隔は 1m とした。比抵抗が高くなると、小さな電流でも十分な測定電位が得られる。ただし、市販の装置の測定範囲は±5~10V 程度であるので、ポール・ポールやウェンナー配置では電極間隔が小さくなると測定不能となる恐れがある。この場合、送信電流を抑えることが必須であるが、一般に電流値は標準抵抗あるいはシャント抵抗に生じる電位差で計測するので、電流を小さくするほど計測精度は低下するという問題が生じる。比抵抗の高い場所で浅部探査をする場合は、出力の小さな装置が望ましいと考えられる。

## 3. ベントナイト探査の例

産総研では民間会社と共同で、電気探査のベントナイト鉱床探査への適用方法の研究を実施した。そのフィールド試験として、露天掘りのベントナイト鉱山において、電気探査の測定を実施した(高倉ほか, 2011a)。当鉱山で採取したサンプルの比抵抗測定から、対象となるベントナイトの比抵抗は 2~

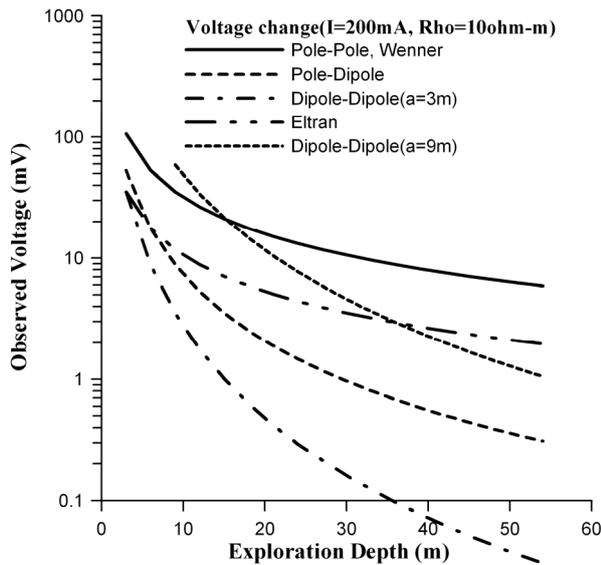


Fig.1. Relations of the investigation depth and measured potential of typical electrode arrays for the homogeneous earth of 10 ohm-m.

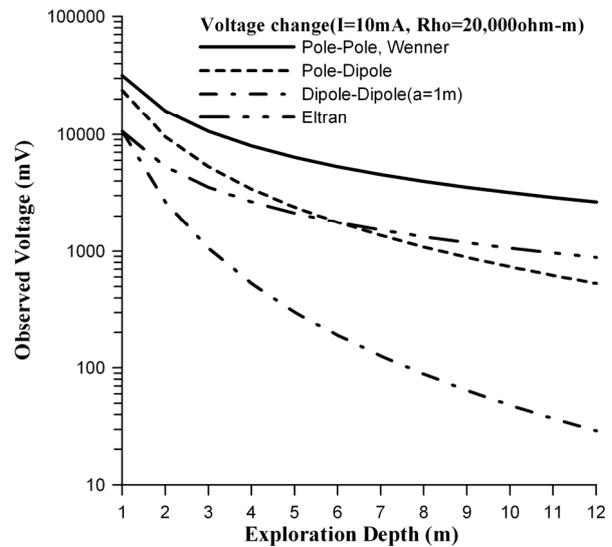


Fig.2. Relations of the investigation depth and measured potential of typical electrode arrays for the homogeneous earth of 20,000 ohm-m.

6Ωm 程度であった。このように対象となる層の比抵抗が低いことから、測定では多チャンネル装置 AES-6A を使用した。この装置の主な仕様を Table 1 に示す。本装置は、最大電圧 350V で、最大 1A までの電流を流せるという特長を有する。また、測定はパソコンによって制御され、任意の電極配置でのデータ取得が可能である。

現地測定では調査地を覆うように 4 本の測線を設け、測線上に 3m 間隔で電極を設置した。探査深度や測定効率を考えると 2 極法の測定が望ましいと考えられたが、調査地の制約から遠電極を設置することができなかった。そこで、測定では電極間隔  $a$  を広げたウェンナー配置とダイポール・ダイポール配置を併用して、比抵抗構造を求めた。得られたデータから解析した比抵抗断面の一例を Fig.3 に示す。

この探査では、深度 50m 程度までの比抵抗構造を解析することができた。低比抵抗部の分布は、地表で観察されるベントナイトの分布域とよく一致した。また、本鉱山で行われたボーリング調査で確認されたベントナイトの位置と概ね整合した。このことから、大きな電流を流す装置を使用することによって、電気探査がベントナイト鉱床の探査に有効であると示すことができた。

Table 1. Main specifications of AES-6A

送信電流	: 1000mA までの任意の定電流
最大電圧	: 最大 350V
電流波形	: 交替直流 (DC~2Hz 程度)
測定電位	: ±20V (200mV, 2V, 20V ゲイン)
受信分解能	: 10μV (20 ビット積分型 A/D)
入力抵抗	: 10MΩ
電源	: AC100V(50/60Hz)
定制御・記録	: Windows パソコン(シリアル接続)
外形・重量	: 440×405×135mm・10kg
その他	: スキャナーで 509ch まで測定可能

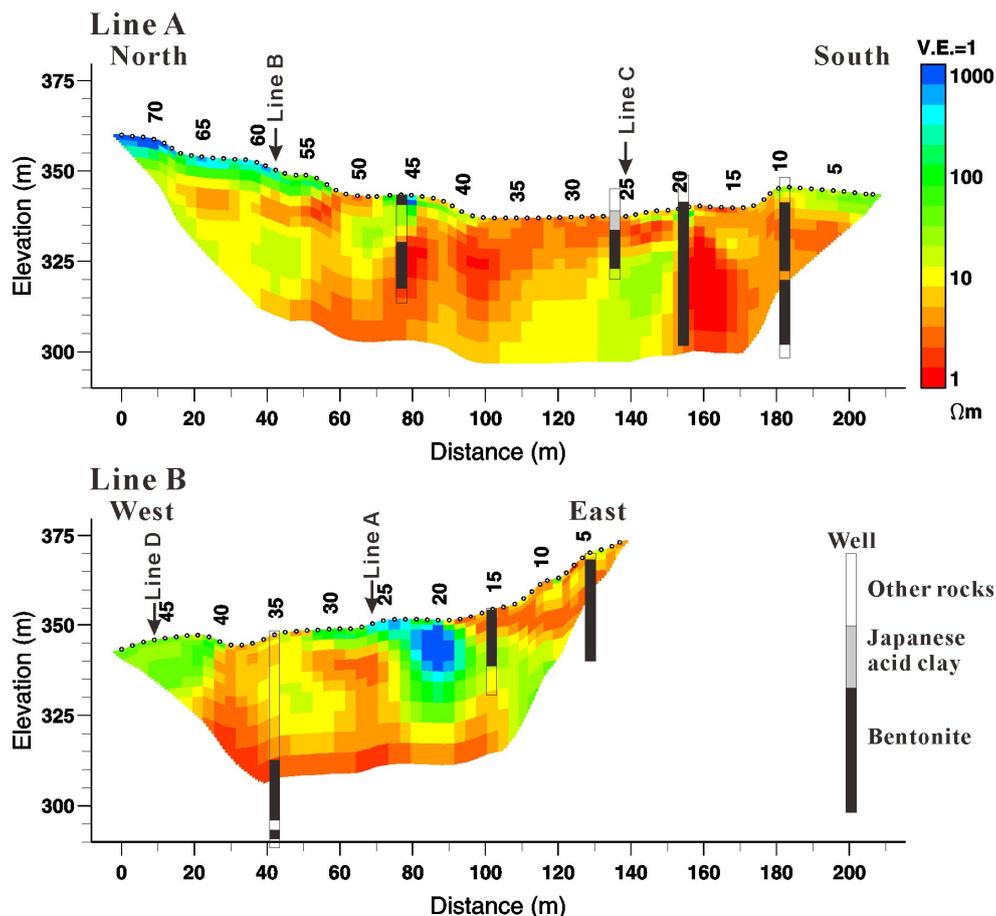


Fig. 3. 2-D resistivity sections analyzed for two survey lines in the bentonite mine after Takakura et al. (2011a).

#### 4. 坑内におけるセリサイト探査の例

産総研では、愛知県にあるセリサイト鉱山をフィールドとして、坑内精密電気探査技術の研究を実施した。実際に生産が行われている鉱山であるため、採掘や坑道掘進が行われているときには十分な測定時間を確保できず、発破が行われると坑内に立ち入ることすらできない。また、セリサイトの比抵抗は数 10~100  $\Omega\text{m}$  程度であるが、母岩は 1,000~3,000  $\Omega\text{m}$  前後であり、接地抵抗が高い場所では十分な電流を流すのが難しい。そのようなことから、測定では 64 チャンネル電気探査装置 AES-6L を使用した。この装置の主な仕様を Table 2 に示す。パソコンで測定パラメータを入力することで任意の時間に自動でデータ取得ができ、小型・軽量・防水で、バッテリー駆動が可能であるので、機動性が高いという特長を有する。また、最大電流が 200mA、最大出力電圧が 300V であるので、数 10m の探査深度も得ることができる。

測定は Fig.4 に示す 3 箇所で行った。電極には直径 1cm の鉄棒を用いた。坑壁（岩盤）にドリル

で深さ 10cm ほどの穴を穿孔し、接地抵抗を下げるために食塩と水を混ぜたベントナイトを鉄棒に付け、それを穿孔した穴に差し込んだ。電極によって差はあるが、接地抵抗を 1~2k $\Omega$  程度にすることができたので、50~100mA の電流を送信することができた。測定場所の近くでは採掘や坑道掘進が行われていたため、遠電極を設置することができなかったため、電極配置はダイポール・ダイポール配置とウェンナー配置を使用した。夜間に無人連続測定を行うことにより、S/N 比の高いデータを効率的に取得することができた。

Fig.4 には各測線の 2 次元解析結果を示す。粘土化を受けた部分が低比抵抗体として解析されるなど、熱水変質を受けた領域と強固な岩盤の部分が識別された。

Table 2. Main specifications of AES-6L

送信電流	: 200mA までの任意の定電流
出力電圧	: 300V
電流波形	: 交替直流 (DC~2Hz 程度)
測定電位	: $\pm 20V$ (200mV, 2V, 20V ゲイン)
受信分解能	: 10 $\mu V$ (20 ビット積分型 A/D)
入力抵抗	: 10M $\Omega$
電源	: DC12V
切替リレー	: 電流電極 標準 64 対 : 電位電極 標準 64 対
制御・記録	: Windows パソコン(シリアル接続)
外形・重量	: 560 $\times$ 360 $\times$ 190mm $\cdot$ 14 kg
その他	: 簡易防水, キャリー付き

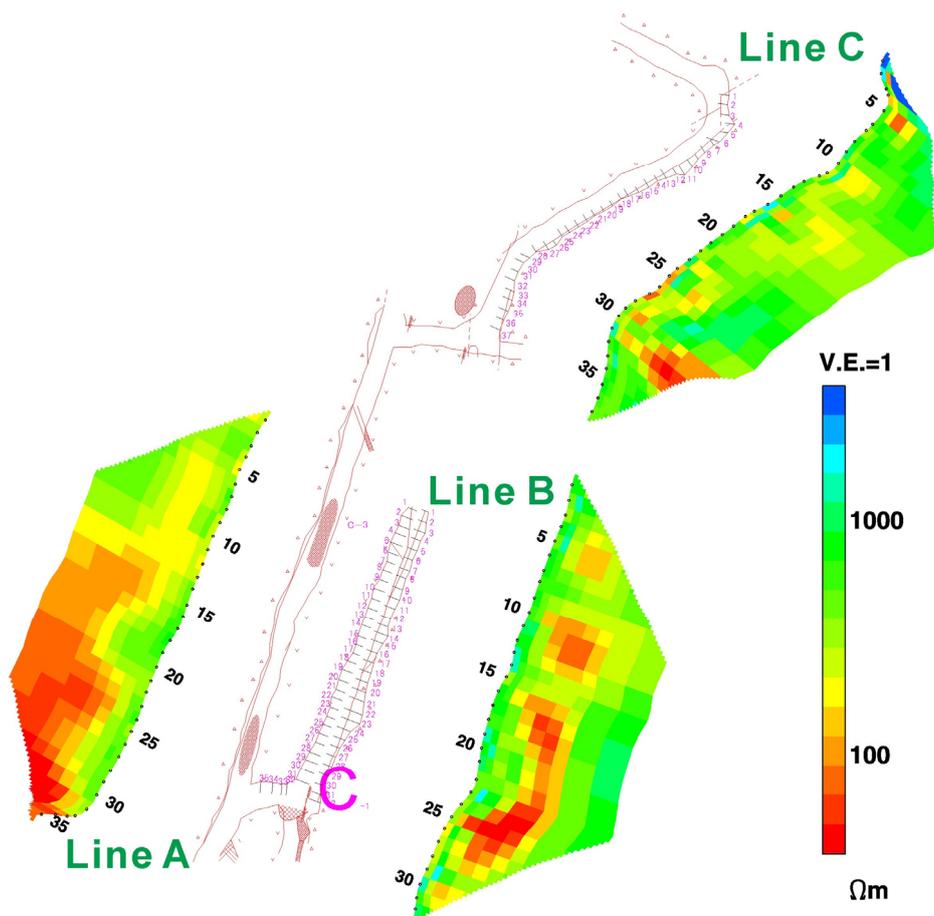


Fig. 4. 2-D resistivity sections analyzed for three survey lines along the tunnel walls in the Furikusa sericite mine.

## 5. 伊豆大島でのスコリア層の例

伊豆大島では自然電位モニタリングを実施しているが、自然電位の降水に伴う大きな変動が観測される観測点がある。そこで、ごく表層を対象として、降雨の前後に電気探査モニタリングを実施した。当該地域はスコリア層に覆われ、乾燥時には地表付近の比抵抗は  $10,000 \Omega\text{m}$  を越える。そのため、前述の AES-6A や AES-6L では、接地抵抗が高く、最大出力電圧  $350\text{V}$  でも電流が  $10\text{mA}$  程度しか流れない場所もあった。また、これらの装置は  $1000\text{mA}$  もしくは  $200\text{mA}$  の定電流を流すことに重点を置いて調整しているので、電流値が小さいと、電流の安定性や測定精度が低下する。さらに、Fig.2 からわかるように、接地抵抗を下げた電流を増やすと、 $20,000 \Omega\text{m}$  を超えるような場所では、電極間隔  $1\text{m}$  のウェンナー法でダイナミックレンジの  $20\text{V}$  を超える。

そこで、伊豆大島のような高比抵抗層を対象とした比抵抗法電気探査に適した多チャンネル電気探査装置 AES-6V を製作した。この装置の仕様を Table 3 に示す。電源や外形は AES-6L と同じであるが、最大出力電圧  $800\text{V}$ 、最大電流  $40\text{mA}$ 、入力インピーダンス  $20\text{M}\Omega$  である。また、電流値が  $5\text{mA}$  以下になっても通電電流は安定しており、その計測誤差は  $0.1\%$  以下である。スコリア層において降雨の前後で実施した電気探査の結果を Fig.5 に示す。降雨に伴う比抵抗変化を精度よく検出することができた。

## 6. 幌延における二酸化探査地中貯留実験

北海道幌延地区に掘削された深度  $150\text{m}$  の井戸（以後、圧入井と呼ぶ）を用いて、二酸化探査 ( $\text{CO}_2$ ) ガス圧入実験が実施された。圧入井には孔口（地表）から深度  $130\text{m}$  までは塩ビ管ケーシングが挿入されており、それ以深はストレーナ加工された塩ビ管が挿入されている。すなわち、圧入深度は  $130\text{m}$  以深となる。本研究では、圧入した  $\text{CO}_2$  ガスの動きを比抵抗でモニタリングするため、電気探査の連続

Table 3. Main specifications of AES-6V

送信電流:	40mA までの任意の定電流
出力電圧:	800V
電流波形:	交替直流 (DC~2Hz 程度)
測定電位:	$\pm 20\text{V}$ (200mV, 2V, 20V ゲイン)
受信分解能:	$10 \mu\text{V}$ (20 ビット積分型 A/D)
入力抵抗:	$20\text{M}\Omega$
電源	:DC12V
切替リレー:	電流電極 標準 64 対 :電位電極 標準 64 対
制御・記録:	Windows パソコン(シリアル接続)
外形・重量:	$560 \times 360 \times 190\text{mm}$ ・14 kg
その他	:簡易防水, キャリー付き

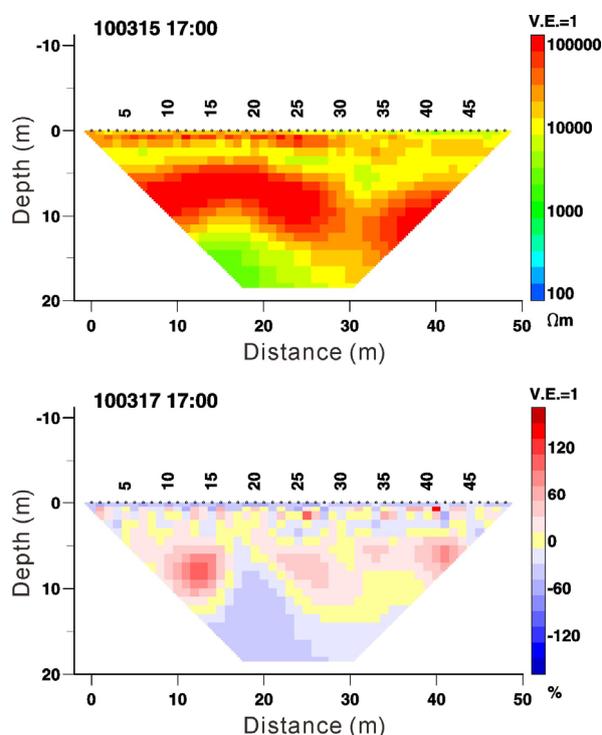


Fig. 5. Analyzed 2-D resistivity section before a rain and its resistivity change after the rain on a scoria layer in Izu- Ohshima volcano.

測定を試みた(高倉ほか, 2011b)。

当該地域の比抵抗は 10~100 Ωm 程度と比較的低く、また目的とする探査深度が 100m を越える。そこで、このモニタリングには低比抵抗体の比抵抗調査に適した多チャンネル電気探査装置 AES-7 を用いた。この装置の主な仕様を Table 4 に示す。装置は家庭用の商用電源 (1500W) で動作可能で、最大出力 800W、最大 4A までの交替電流を流すことができる。また、最大 509 チャンネルまでの任意の電極組み合わせによるデータの取得がパソコンによって自動化されている。

CO<sub>2</sub> 圧入井をほぼ中央にして、360m の測線を設定し、ウェンナー配置、ダイポール・ダイポール配置によるデータ取得を行った。また、測線中央部を対象に、シュランベルジャ配置でのデータ取得も実施した。CO<sub>2</sub> ガスの圧入は 12 月 5 日から 10 日にかけて実施され、圧入前、中、後に 11 回の繰り返し測定を行った。

Fig.6 に、圧入前の比抵抗構造、それに対する圧入中および圧入終了 4 日後の比抵抗変化率を示す。この図から、深度 20~150m 付近の比抵抗変化は、圧入した CO<sub>2</sub> ガスの上昇とそれに伴う地下水の移動によって生じたと判断できる。

## 7. おわりに

本論文では、フィールドの特性や探査の目的に合致させるために設計・開発した電気探査システムを実際のフィールドに適用した例を報告した。いずれの場所もこれまでのやり方では、調査の目的に合う探査の深度や精度を得ることが難しい場所であった。このような場合、まずは電極配置や測線位置を変える努力をするが、現場の状況からのそれが難しいことも多く、装置の能力に応じた限界もある。つまり、市販されている装置では

Table 4. Main specifications of AES-7

送信電流:	4A までの任意の定電流
出力電圧:	650V
最大出力:	800W
電流波形:	交替直流 (DC~2Hz 程度)
測定電位:	±20V (200mV, 2V, 20V ゲイン)
受信分解能:	10 μV (20 ビット積分型 A/D)
入力抵抗:	10MΩ
電源:	AC100V(50/60Hz)
最大定格電力:	1500VA
定制御・記録:	Windows パソコン(シリアル接続)
外形・重量:	443 × 334 × 312mm・20.0kg
その他:	:スキャナー5092ch までの測定可能

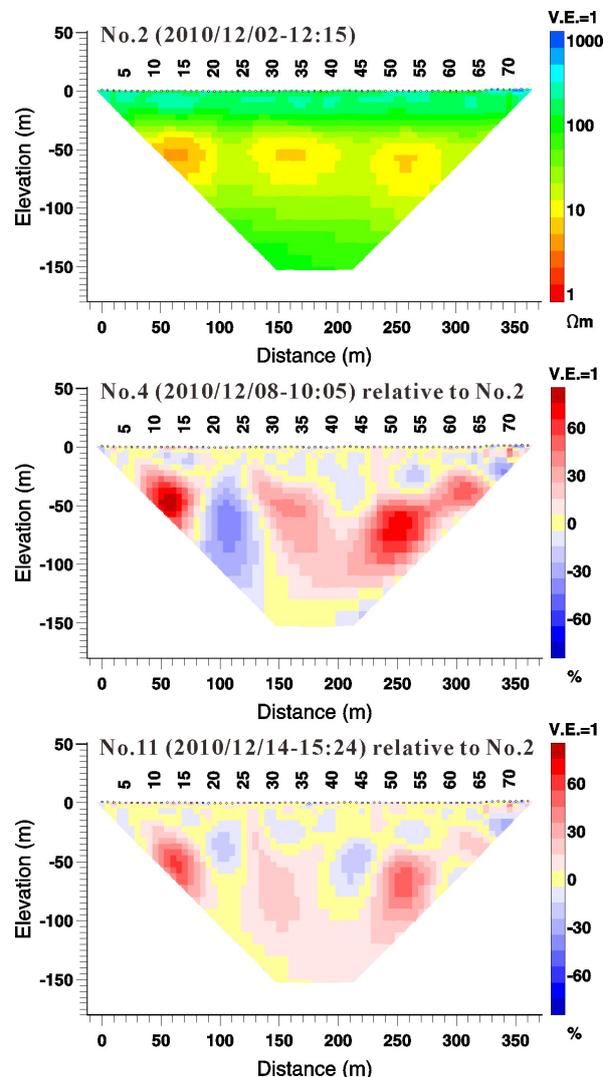


Fig. 6. Analyzed 2-D resistivity section before the CO<sub>2</sub> injection and its resistivity changes during and after injection in the Horonobe area (Takakura et al, 2011b).

探査の目的を達成できないことも多い。このような場合、新たな電気探査装置の開発が必要となる。

筆者は、フィールドの特性や探査の目的に合致させる電気探査を「カスタムメイド電気探査」と名付けている。この言葉は、カスタムメイド医療（オーダーメイド医療）を参考にして名付けた言葉である。目指すところは、個々のフィールドがもつ特性に合わせた調査を行い、最大限の成果を得ることにある。ただし、カスタムメイド化はコストの増大を伴う危険が高く、その克服が大きな課題の一つである。幸い、ノウハウの蓄積とエレクトロニクス技術の発展により、電気探査装置の設計や製作のコストは下がっている。フィールドの特性を的確に知ることが最大の課題であるが、これはケーススタディを重ね、知識や知恵を蓄積するしかないと思われる。当然のことながら、特性が全く同じフィールドはない。確実に言えることは、これまでの探査例を評価して成功原因や失敗原因を整理するとともに、フィールドにおいて経験を積むことが重要であるということである。

## 謝辞

電気探査装置の設計・製作では、協同電気株式会社の山田雅弘氏をはじめとする電気・電子・電力の技術者に協力を頂いた。

## 参考文献

高倉伸一・松島喜雄・西祐司・石戸恒雄・鬼澤真也(2010): 伊豆大島火山モニタリングのための比抵抗探査、物理探査学会第122回(平成22年度春季)学術講演会講演論文集、188-191.

高倉伸一・南大樹・高木哲一・伊藤雅和(2011a): 電気探査によるベントナイト鉱床の探査と評価 -宮城県土浮山鉱山を例にして-、物理探査、64, 309-318.

高倉伸一・當舎利行・杉山長志・徳丸哲義(2011b): 北海道幌延地区での小規模二酸化炭素圧入実験における比抵抗法とAMT法の繰り返し測定、物理探査学会第124回(平成23年度春季)学術講演会講演論文集、243-246.