

坑内における IP 法測定

高倉伸一（産業技術総合研究所）

IP measurements in tunnels

Shinichi Takakura (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

Abstract

The development of the IP (induced polarization) measurement technique applied inside a tunnel is needed in order to estimate the subsurface resistivity and chargeability structure with high precision. One of the biggest problems in IP surveys inside a tunnel is how non-polarizable electrodes are fixed on a perpendicular hard base rock of the tunnel. This problem was conquered by fixing non-polarizable electrodes to a base rock with the plaster which is mixed with the same salts used for the non-polarizable electrodes. By using this electrode installation method, highly precise IP measurements were carried out in tunnels of a mica mine.

1. はじめに

地下の状況を電気探査によって正確に把握するためには、地表からの測定では限界がある。分解能や精度を向上させるためには、地下に電極を設置することが必要である。その方法の 1 つは坑井を利用したトモグラフィであり、資源分野や土木分野では実用されている。他の方法として坑道（トンネル）を利用することであげられる。坑内掘りをしている金属鉱山や粘土鉱山などでは多くの坑道が掘削されているので、それを利用して近傍にある未発見の資源を探索するのは経済的といえる。また、多くの坑道は人が入れるように作られているので、確実に電極を設置できるという利点がある。さらに、大深度地下空間利用施設や高レベル放射性廃棄物などの地層処分では、建設時に坑道（トンネル）が掘削されるので、坑道を利用した電気探査は、岩盤強度の評価や周辺環境への影響評価などに貢献できると考えられる。

しかしながら、これまで坑道を使用して実施した電気探査の実例は少なく、その方法についてはほとんど確立していないのが現状である。また、坑内の電気探査では車の往来の妨げにならないように、坑壁や天井部分を対象にすることが多いと考えられるが、その際に問題になるのは電極の設置方法である。特に IP 法に使用する非分極性電極は、接地面に多孔質物質や保水性物質を用いているので、金属電極と比較すると機械的な強度が弱く、水平ではない固い岩盤に打ち込むことが難しい。したがって、坑内における IP 法探査を実用的にするには、非分極性電極の設置方法を考える必要がある。

今回、坑内掘りをしているセリサイト粘土鉱山の坑内において、IP 法調査を実施する機会があった。そこで、まず、岩盤に非分極性電極を設置する方法を考案し、岩盤が露出している坑壁で IP 法の試験

測定を行った。そして、その方法が有効であることを確認し、いくつかの坑道で IP 法調査を試みた。本論文では、岩盤に非分極性電極を設置する方法について紹介するとともに、いくつかの坑道で実施した IP 法調査結果について報告する。なお、本研究のフィールドとなったセリサイト鉱山の概要については、高倉ほか(2005a)、高倉ほか(2005b)で報告している。

2. 坑内での IP 法試験測定と調査例

IP 法の試験測定は高さが約 2m、幅が約 2.2m の長方形の形をした坑道の坑壁で実施した。この試験では、壁面の高さ 1m の位置に、坑道の方角に沿って長さ 25m の測線を設置し、1m 間隔に 26 個の電極を設置した。Fig.1 に坑道周辺の地質平面図と電極位置を示す。測線の中央にはセリサイト粘土脈があり、その両側は安山岩で覆われる。安山岩は緻密であるが、粘土脈とほぼ平行に伸びる節理や割れ目があり、その周辺は熱水変質を受けている。安山岩の外側には凝灰岩が露出している。岩石サンプルの複素比抵抗測定から、セリサイト粘土脈は周辺の安山岩と比較すると低比抵抗であり、また粘土脈付近の熱水変質を受けた安山岩は高い充電率を示すことが知られている。

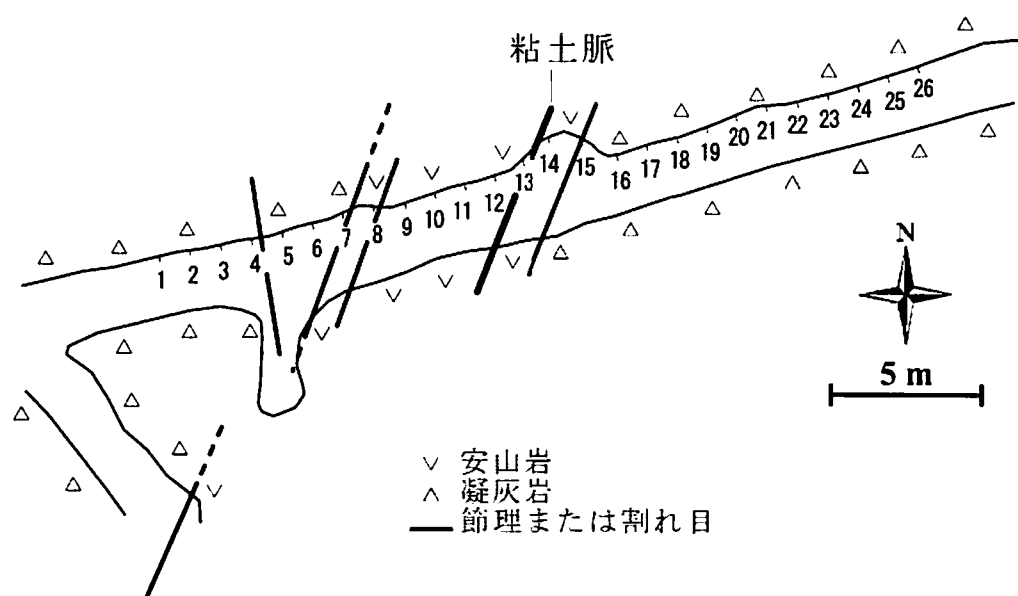


Fig.1 Geological map and the electrode location of a tunnel where the IP test measurement was carried out.

今回の試験測定で使用した非分極性電極は石膏型の鉛-塩化鉛電極である。これは今回の測定のための試作品で、直径 28mm、内径 20mm、長さ 90mm の塩ビ製パイプの中に、塩化鉛粉末、塩化ナトリウムを所定の割合で混合した含水石膏で覆われた鉛電極を入れたものである。電極の片側からは鉛電極と結ぶリード線が出て、その周囲は絶縁シールされている。もう片側の石膏面は露出しており、そこが接地面となる。石膏が乾燥しない限り、横にしても、逆さにしても使用できるという利点がある。

鉛-塩化鉛電極の岩盤への接着は次のように実施した。まず、電極位置に大型のハンマードリルを用いて径 30mm、深さ約 10mm の穴を穿孔した。次に鉛-塩化鉛電極に使用されている石膏と全く同じ割

合で混ぜた塩化鉛粉末、塩化ナトリウム、石膏を水で溶いた。そして、それをゲル状の状態のまま Fig.2 の写真のように穿孔した穴に入れ、すぐに鉛-塩化鉛電極を差し込み、石膏が固まるまで待った。今回は鉛-塩化鉛電極を使用した。この方法を応用すれば Fig.3 のように、他の非分極性電極でもそれに使用されている塩を石膏に混ぜることによって岩盤に密着させることが可能となる。これについては、現在、特許申請中である。

石膏が固まってから、電流番号1番の電極を基準として残りの電極との電位差を比較したが、得られた値は非常に安定したものであった。このことは、この方法によって設置された鉛-塩化鉛電極は安定したものであり、自然電位の測定やモニタリングにも使用可能であることを示唆している。また、それぞれの電極の接地抵抗は $1 \sim 1.5 \text{ k}\Omega$ 前後であった。この程度の接地抵抗であるならば、電流電極として使用することも十分に可能である。実際、任意の2つの電極を選び、電気探査装置 SYSCAL-R2 を使用して電流を流したところ、200V の電圧でも $30 \sim 100 \text{ mA}$ の安定した直流電流を流すことができた。この試験測定では比較のため、非分極性電極の約 10cm 上方に径 8mm の穴を開け、径 6mm の鉛電極をベントナイトとともに打ち込み、さらに直径 60mm の銅網を岩盤表面にベントナイトで貼り付けた金属製電極も設置した。その接地抵抗は $0.5 \sim 1 \text{ k}\Omega$ 前後であり、鉛-塩化鉛電極より低いものの、直流電流の安定性については両者では変わらなかった。

IP 法の測定はダイポール・ダイポール配置で実施した。電極間隔 a は 1m であり、電極隔離係数 n は 1~5 とした。この測定では、まず電流番号1番と2番の対から電流を流し、その右側の3番と4番の対で電位を測定した。次に電流電極の対は同じで、電位電極の対を4番と5番、5番と6番、6番と7番、7番と8番と順次右側に移動して、同様の測定を繰り返した。そして、電流電極の対を2番と3番とし、電位電極の対を4番と5番にし、同様の測定を繰り返し、1つの電流電極の対に対して5つの電位電極の対の測定が終われば、電流電極の対を1つ右側に移動した。非分極性電極に電流を流すと

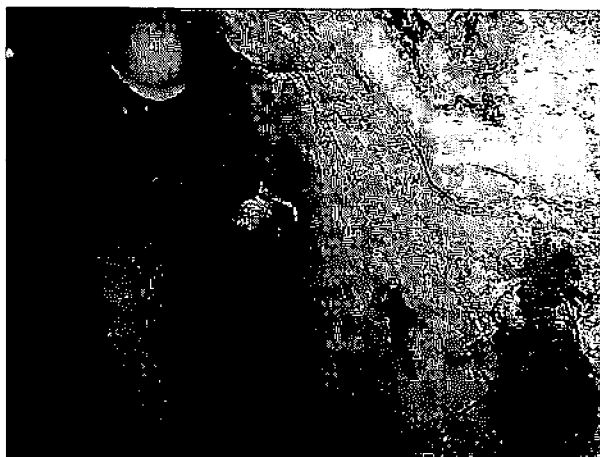


Fig.2 Fix of a non-polarizable electrodes.

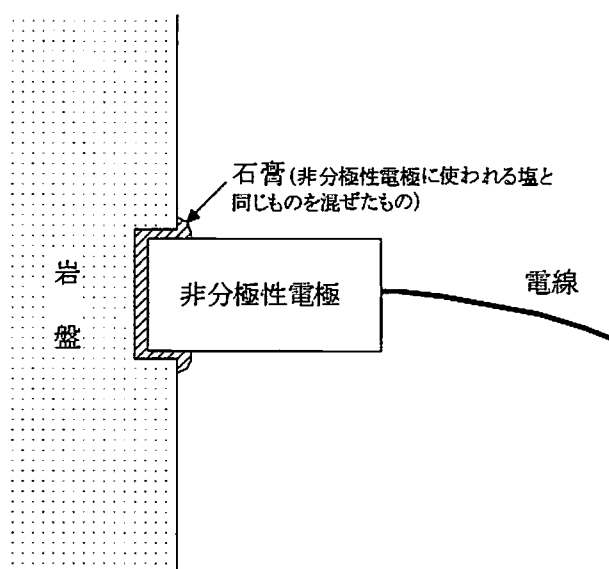


Fig.3 The installation method of a non-polarizable electrode to a perpendicular base rock..

化学的な平衡状態が変わり、ノイズの発生により測定電位の S/N 比が低下することが心配されるが、上述の手順でダイポール・ダイポール配置による測定を実施することにより、電流電極として使用した後に電位電極として使用する電極はないので、この問題は避けられる。

測定は SYSCAL-R2 を用いて時間領域測定で行った。電流送信中の電流値と電位差を測定することで見掛け比抵抗（単位： $\Omega \text{ m}$ ）を求め、電流遮断後の電位差の積分値を送信中の電位差で割って見掛け充電率（単位： mV/V ）を求めた。

見掛け比抵抗擬似断面図と見掛け充電率断面図を Fig.4 に示す。図の下が壁面にあたり、図の上が壁面の奥となる。この図からわかるように、粘土脈に対応して低比抵抗が検出され、また熱水変質を受けた安山岩に対応して高い充電率が検出された。この結果は、今回の方法で垂直な岩盤での比抵抗電気探査や IP 法電気探査ができることを示唆している。

この測定後に塩化鉛粉末を混合せずに塩化ナトリウムと水だけを混合した石膏による鉛-塩化鉛電極の設置も 2 点で行ったが、塩化鉛粉末を混合したときと同じ結果が得られた。これが全ての場合に適用できるかの判断はできないが、環境に配慮する場合は、石膏に混ぜる塩を無害なもので代替することも可能と考えられる。

なお、石膏で固定した鉛-塩化鉛電極は簡単に外すことができ、残った石膏は岩盤と比較すると柔らかいので削り落とすことは容易である。岩盤が十分に固ければ、掘削した穴は長期間残るので、同じ位置に同様に新しい鉛-塩化鉛電極を設置することができる。すなわち、この設置方法は繰り返し測定にも適しているといえる。

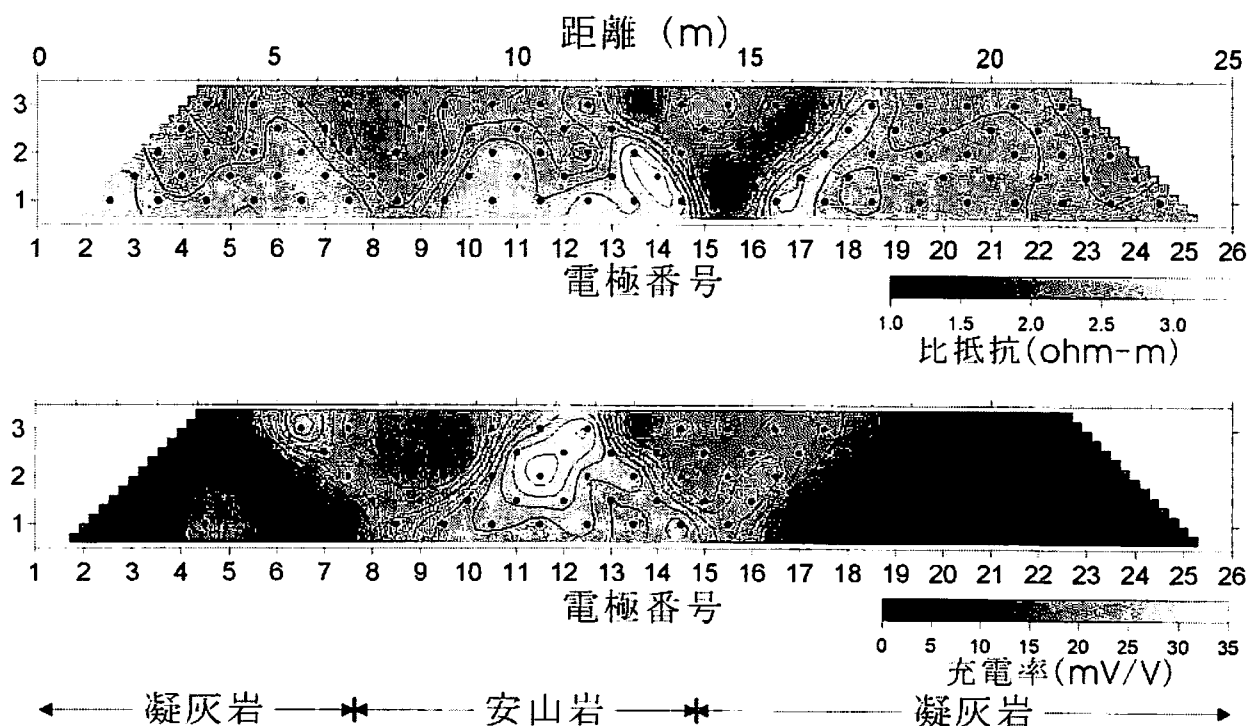


Fig.4 Apparent resistivity pseudosection (upper) and apparent chargeability pseudosection obtained from the IP measurement.

今回の IP 試験測定の後、セリサイト粘土脈の存在が予想される 6 測線において、試験測定とほぼ同様な方法で IP 法調査を実施した。これらの調査では光波測量によって電極位置を正確に求めたため、得られたデータに 2 次元解析を適用し、比抵抗断面と充電率断面を求めた。その結果を Fig.5 に示す。この図からわかるように、セリサイト粘土脈の存在を示唆するような低比抵抗異常や高充電率異常の領域がいくつか検出されている。現在、これらのデータに基づいて掘削を進めている。その結果については、別途報告する予定である。

3. おわりに

本研究では坑内における IP 法電気探査の実用化を目指している。坑内における IP 法測定では非分極性電極の岩盤面への設置方法が最大の課題であったが、非分極性電極に用いている塩を混合した石膏によって非分極性電極を岩盤に固定することで、坑道を利用した IP 法調査が精度良く実施できた。しかも、この方法では接地抵抗も相当に低くなるので、設置した非分極性電極が電流電極としても使用できることが確認できた。IP 法では、水や熱に敏感なパラメータである比抵抗のほか、電気化学的なパラメータである充電率の分布を求めることができるので、坑内における IP 法の技術が、今後、いろいろな分野で利用されると期待したい。

謝辞

本研究で使用した鉛-塩化鉛電極の製作およびその試験測定では、(有)アスクシステムの水津彰氏および三信鉱工(株)の中田孝二氏にご協力をいただいた。また、現地調査では三信鉱工(株)および日鉄鉱コンサルタント(株)の関係者からご協力をいただいた。さらに IP 法データの 2 次元解析では、九州大学の佐々木裕博士に解析プログラムの提供を受け、また指導して頂いた。ここに厚く謝意を表する。

参考文献

- 高倉伸一・石戸経士・安川香澄・高橋武春・手島稔(2005a): セリサイト鉱山における自然電位調査, 物理探査学会第 112 回学術講演会講演論文集, 281-284.
- 高倉伸一・須藤定久・村上浩康・高橋武春・手島稔(2005b): セリサイト鉱山における比抵抗構造調査, 物理探査学会第 112 回学術講演会講演論文集 285-288.

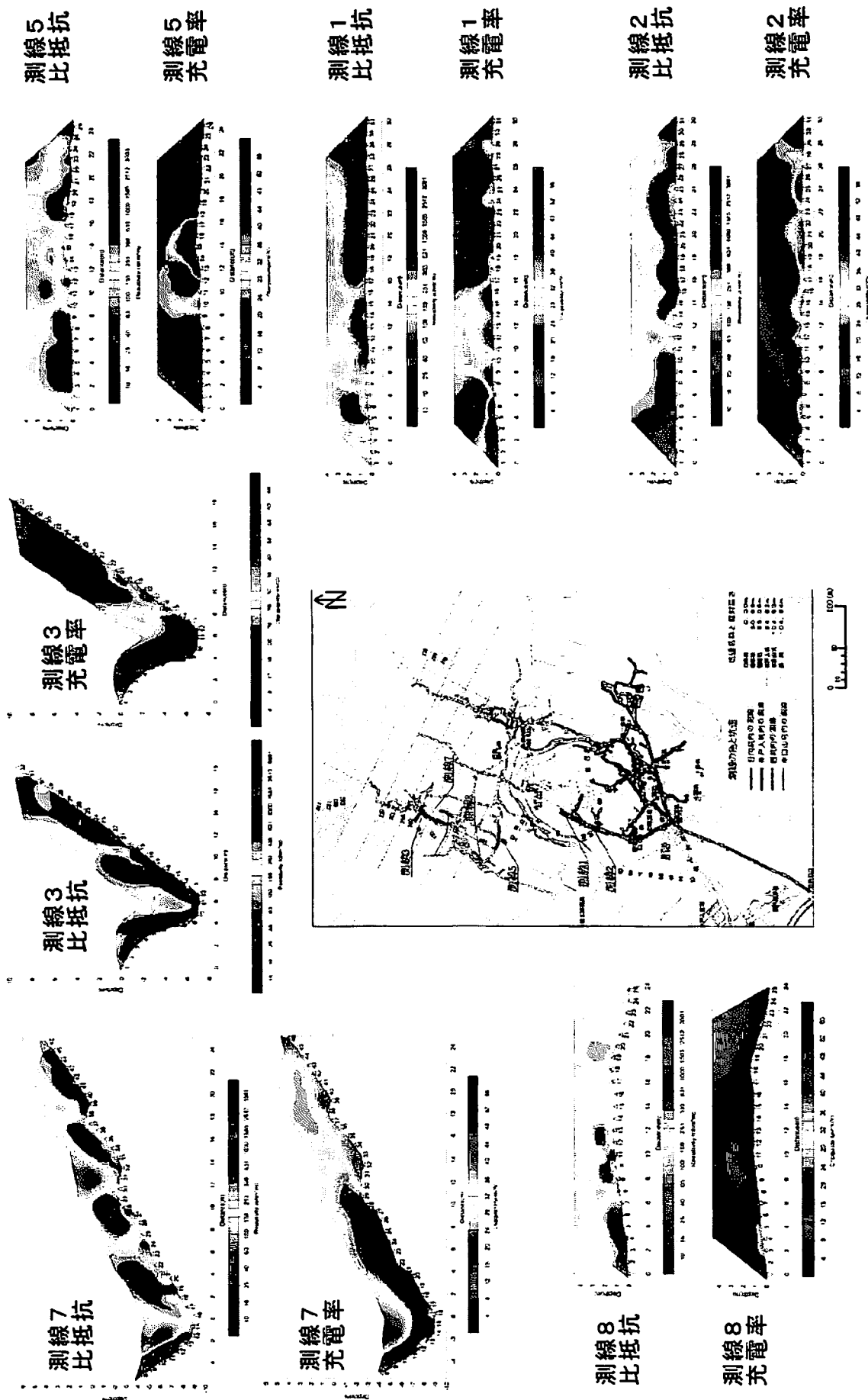


Fig.5 Resistivity and chargeability sections calculated from two-dimensional inversion for six lines.