

セリサイト鉱山の坑道での地中レーダ探査

高倉 伸一¹⁾・鈴木 敬一²⁾・中田 孝二³⁾

1. はじめに

地中レーダは、地中における電磁波の反射・屈折・透過などの物理現象を利用し、電磁波を地下に向かって連続的に照射しながら、アンテナを移動させることにより非破壊に地下構造を探査する方法である。物理探査法の中でも最も高い分解能を有することから、我が国では1980年代から人工埋設物の探知などの土木分野や遺跡調査などの考古学分野で広く利用されてきた。また、1995年兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)後は活断層調査などの防災分野への適用が増えている。

地中レーダの最大の問題は探査深度が小さいことである。地中における電磁波の減衰は大きく、とくに水分の多い地層中では著しい。そのため、湿潤した地層の多い我が国では探査深度が5mに届かないことも多く、地質調査に適用しにくいのが現状である。とくに深部を対象とする資源探査では、坑井内で利用するポアホールレーダを除き、地中レーダはほとんど利用されていない。しかしながら、地中レーダの高い分解能は非常に魅力があり、経済的価値の高い希少資源の探査には有効な手法になると考えられる。また、地表から電磁波は届かなくても、坑内に装置を運ぶことができれば、地下深部での探査は可能となる。このような考えから、我々は、坑内採掘で良質なセリサイトを産出している粟代鉱山(愛知県北設楽郡東栄町)において、地中レーダの坑内探査への適用性を検証する実験を行った。本報ではその結果について紹介する。

2. 粟代鉱山の概要

粟代鉱山は三信鉱工株式会社が所有するセリサイ

ト鉱山であり、地質ニュースにおいて岡村(1999)が詳しく説明している。当該鉱山は新第三紀の火山活動で形成された大峠コールドロン中にある。コールドロン形成後に、環状の火山岩体(大峠コーンシート)が形成され、その後に北北東-南南西方向の平行な岩脈(設楽火成複合岩体)の貫入が起きた(Geshi, 2005)。当該地区のセリサイト鉱体の多くは安山岩の岩脈内部やその縁に発達する節理に沿って分布しており、設楽火成複合岩体の貫入によって形成されたと考えられる。ここで産出されるセリサイトは、その純度の高さと優れた感触性、更には高い白色度を有していることから世界的に見ても大変貴重なもので、化粧品、特にファンデーション用の原料として重宝されている。

当該鉱山のセリサイトの年間産出量は数1000トンである。これは一般的な金属鉱山の産出量と比較すると非常に少ないが、付加価値の高い製品の原料として使われることから、利益を上げることが可能である。現在、当該鉱山では採掘スタッフの経験と勘を頼りに、高さの異なる水平坑道を編み目のように掘削しながら(口絵-第1図参照)、セリサイト鉱脈の探査が行われている。しかしながら、鉱脈の幅は数m以下であることが多く、その分布も複雑であることから、掘削した坑道が必ずしも鉱脈に当たらないことや、当たっても採掘可能な量や質が伴わない鉱脈であることも多い。そのような場合、新たな鉱脈を探して違う方向へと坑道を掘削することが必要となるが、既存の坑道から横方向へと掘削することが効率的であるので、坑壁から岩盤内部を探査することが望まれている。

3. 地中レーダ探査

3.1 データ取得

キーワード: 地中レーダ(GPR), 坑内調査, 電磁波速度, 割れ目, 粟代セリサイト鉱山

1) 産総研 地図資源環境研究部門
2) 川崎地質株式会社
3) 三信鉱工株式会社



写真1 使用した地中レーダ装置の外観。



写真2 地中レーダのアンテナを坑壁にしっかりと押さえつけている様子。

地中レーダ探査実験は、坑道中で岩盤が比較的広く露出している区間を10箇所選んで実施した(口絵-第1図参照)。これらの場所では、比抵抗法/IP法電気探査が実施されている(高倉・中田, 2006)。その際、光波測量によって電気探査測線に沿った坑壁の起伏が正確に求められた。また、坑壁には1mおきに配置した電極の跡が残され、電極番号がペンキで書かれている。地中レーダ探査はその測線に沿って実施した。一つの測線の長さは13~45mであるが、岩盤強度の弱い場所は支保が設置されているため、連続して地中レーダの測定ができない箇所もある。その場合は、測線を適宜分割して測定を行った。総測線長は241.5mであった。

使用した測定装置は写真1に示すコマツエンジニアリング社製のMGPR-10である。装置の仕様を第1

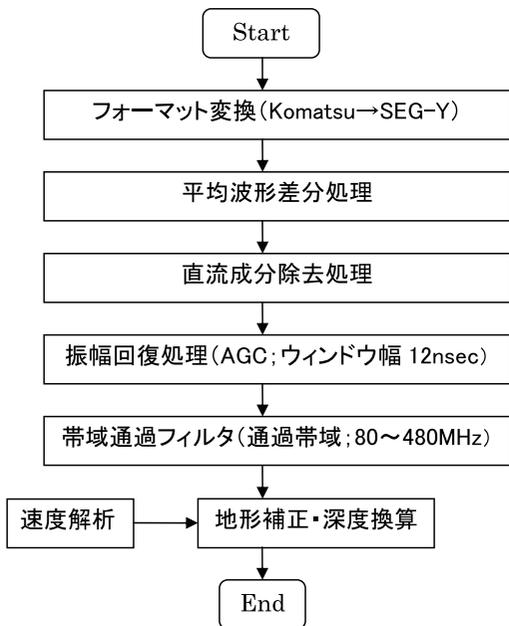


写真3 鉱山坑道での測定風景。

第1表 使用した地中レーダ探査機器の仕様。

項目	多目的レーダシステム(MGPR-10)
アンテナ	400MHz
ADコンバータ分解能	12bit
データビット長	16bit
平均処理回数	256回(可変)
時間レンジ	10, 20, 30, 60, 120, 240(切替式)
データ記録媒体	RAM→ハードディスク※(1)
通信ケーブル長	6, 12m
画像表示階調	白黒256階調
電源	AC100V or DC12V
重量	ノートパソコン+サポートユニット: 約8Kg レーダ回路: 約2Kg
データ処理	計測用ノートパソコンで実施
標準データ処理機能	差分処理, STC処理, 空間フィルタ処理

※(1) 計測中はRAMに記録し、計測終了後ハードディスクに記録。

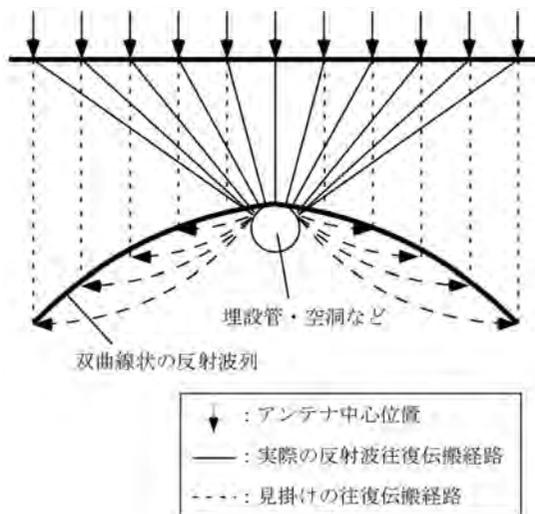


第1図 データ処理のフロー図。

表に示す。アンテナは中心周波数が400MHzであり、小型軽量であることから一人でも容易に持ち上げて動かすことができる。ただし、測定の際に坑壁とアンテナとの間に大きな隙間ができると、坑壁表面で電磁波のほとんどが反射してしまい、地中からの電磁波の反射波が捉えられなくなる。そこで、写真2のようにアンテナを坑壁面にしっかりと押さえつけ、可能な限り良好な反射記録がとれるように努めた。坑壁の起伏が激しいところや崩れかかっているところもあるので、実際の測定では写真3のように、アンテナを二人がかりで坑壁に押さえつけながらできるだけ等速度で移動させ、一人がパソコン上で反射記録をリアルタイムで確認しながらデータを取得した。1測線あたりの測定時間は正味1~2分間であったが、反射記録の品質が芳しくない場合はアンテナを坑壁へさらに強く押しつけるようにして再測定を行った。なお、口絵の写真2に坑壁に沿って地中レーダ測定を実施している様子を3枚組写真として示す。

3.2 データ処理

探査結果の解釈に先立ち、データ処理を行った。データ処理のフローを第1図に示す。まず、測定装置に記録されたデータを汎用フォーマットの一つである



第2図 地中の異常物による回折波。

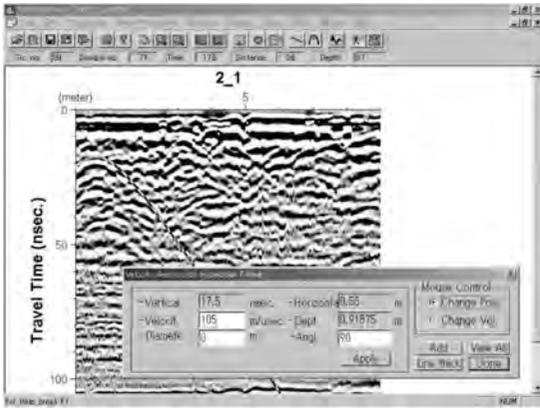
SEG-Yに変換した。次に、各プロファイルの平均波形を差し引くことにより、反射波を強調する平均波形処理を行った。さらに、装置に固有のSTC (Sensitivity Time Control) の歪により生じる直流成分を除去する処理を行った。その後、岩盤による減衰や幾何減衰を補償するための振幅回復処理 (AGC) およびノイズを低減するための帯域通過フィルタを施し、明瞭な時間断面を求めた。

坑壁面は平坦ではないので深度断面を求めるためには地形補正が必要となるが、坑壁の起伏については光波測量で求めた値を用いた。また、深度断面の計算には電磁波の伝搬速度が必要であるが、これについては以下のように、回折波を利用したパターンマッチング法で求めた。

地下に埋設管や空洞などの異常物が局所的に存在すると、得られる反射記録は時間断面上で、第2図のように双曲線状のパターン (回折波という) を示す。ここで、電磁波速度を v 、往復の伝搬時間を t 、送信アンテナと受信アンテナの距離を x とすれば、深度 d は次式で表わされる。

$$d = \sqrt{\left(\frac{v \cdot t}{2}\right)^2 - \left(\frac{x}{2}\right)^2}$$

この式から明らかなように、双曲線の形状は電磁波速度によって決まる。つまり、時間断面上に回折波



第3図 パターンマッチング法による速度解析。

が現れていれば、その双曲線状のパターンを再現できる電磁波速度を求めてやればよい。実際にはパソコン上で様々な電磁波速度を仮定して双曲線の形状を計算し、実データに表れている回折波の双曲線状のパターンをもっともよく再現できる速度を最適な電磁波速度とした。

パターンマッチング法を適用した例を第3図に示す。画面左側に明瞭な回折波が見られるが、この形状をもっともよく再現する電磁波速度として、105m/ μ sec (10.5cm/nsec = 1.05×10^8 m/sec)を得た。本実験では、この速度値を用いて、地形補正および深度換算を行った。

なお、この値を比誘電率 ϵ_r に換算すると、

第2表 室内測定で得られたサンプルの比誘電率。

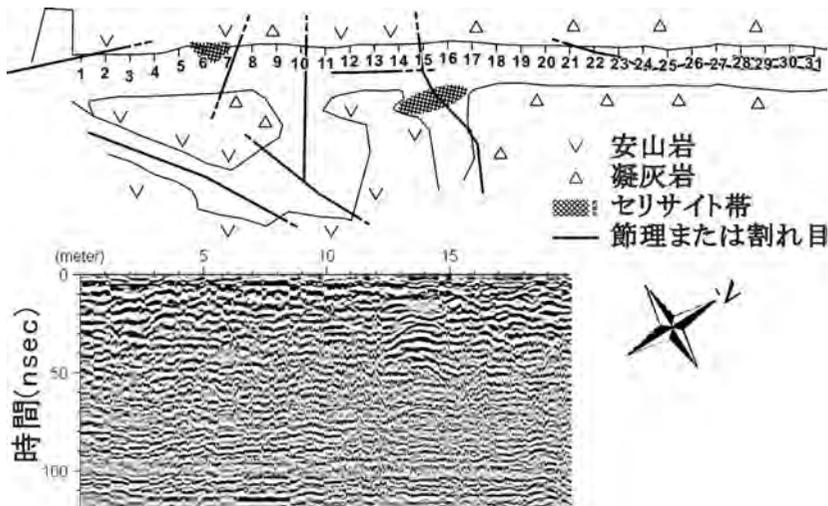
サンプル	岩種	自然状態	強制乾燥	強制湿潤	間隙率(%)
No.1	安山岩	7.20	7.08	15.01	7.47
No.2	凝灰岩	12.97	10.85	14.96	2.28
No.3	凝灰岩	6.17	5.66	11.28	8.55
No.4	安山岩	6.22	6.09	10.82	6.50
No.5	安山岩	9.51	8.27	11.26	1.78
No.6	凝灰岩	8.05	7.24	11.66	3.84

$$\epsilon_r = \left(\frac{C}{v}\right)^2 = \left(\frac{2.998 \times 10^8}{1.05 \times 10^8}\right)^2 = 8.15$$

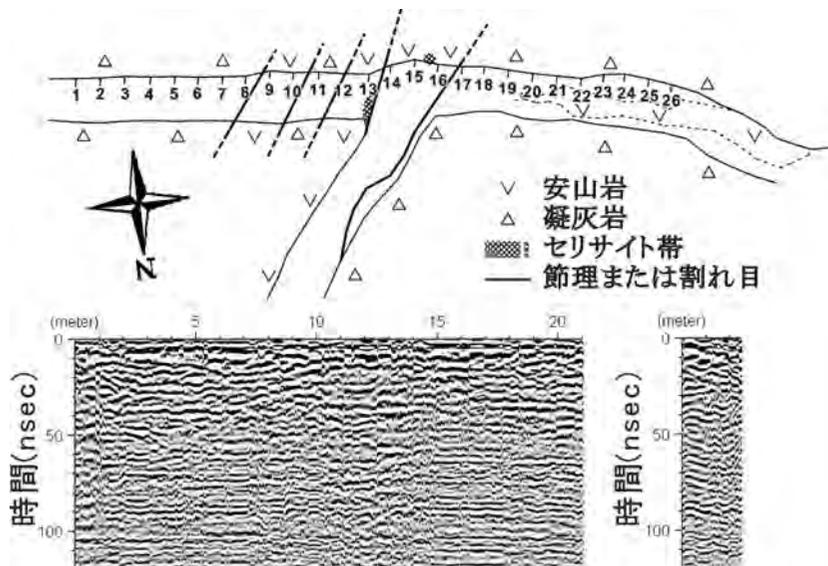
となる。ここで、Cは真空中の電磁波速度(光の速度)である。坑内で採取した6種の岩石サンプルをインピーダンスアナライザで比誘電率を求めた結果を第2表に示す。比誘電率は乾燥状態で5.66~10.85、湿潤状態で10.82~15.01であるので、上記の電磁波速度は妥当なもの判断できる。

3.3 探査結果

本報では、代表的な2つの測線1と5の結果について示す。測線1の時間断面を第4図に、測線5の時間断面を第5図に坑壁の地質とともに示す。ここで、坑壁に沿って付けられている番号は電気探査で配置した電極位置を示し、その間隔は1mである。また、それぞれの測線で求めた深度断面の解釈図を、電気



第4図 測線1の時間断面と坑壁に沿った地質との比較。



第5図 測線5の時間断面と坑壁に沿った地質との比較.

探査から求めた正規化充電率の断面とともに口絵の第2図と第3図に示す。この図では比較のため、深度断面および正規化充電率の断面を平面図にしているため、図の下が坑道側で、図の上が壁面の奥となる。ただし、本報では便宜的に、奥行きを距離と表している。なお、正規化充電率は充電率を比抵抗で割った値である。充電率が大きく比抵抗が低いほど正規化充電率は大きくなるので、粘土化変質が進んでいる場所は高い正規化充電率となる傾向がある(高倉・中田, 2006)。

(測線1)

測線1では、電極番号15(水平距離: 14m)より左側はほぼ安山岩に覆われ、一部に凝灰岩が露出している。一方、その右側は凝灰岩が連続している。地中レーダの測定は電極番号1から21の20mの区間で実施した。なお、電極番号21付近には割れ目があり、その右側は坑壁の強度が弱く、支保が設置されていたので、地中レーダの測定はできなかった。

第4図の時間断面を見ると、いくつかの回折波が現れていることがわかる。その位置は節理または割れ目のある場所とほぼ一致する。とくに安山岩と凝灰岩の境界である電極番号15に現れている回折波は大きく、口絵の第2図の深度断面よりその位置は約1.5~2.5mの深部とわかる。正規化充電率

断面図を見ると、同じ位置に高異常域が現れており、そこに粘土鉱体のような局所的な物体があると予想される。また、深度断面では水平方向に連続するいくつかの反射面が解析され、その分布は正規化充電率のパターンとよく整合している。この測線での最大探査深度は3m程度であった。

(測線5)

測線5では測線中央部に複数の節理や割れ目があり、電極番号15と16の間には小さいながらも高品位のセリサイト脈が観察されている。地中レーダの測定は、電極番号1から22までの21mの区間で行った。電極番号22から26までは支保があるため測定はできなかった。電気探査の測線からは外れるが、電極番号26の右側2.5mの区間において測定を実施した。

第5図の時間断面を見ると、水平方向の反射面がいくつもあり、ところどころで不連続になっていることがわかる。とくに電極番号15付近では反射面の形状が複雑になっている。この位置にはセリサイト脈とともにいくつもの割れ目があり、岩体は熱水変質作用を受けており、電気探査の結果にも大きな異常が現れていた。そこで、それらの情報に基づいて新たな坑道を掘削し、それに沿った地質やセリサイト粘土の分布域を確認した。口絵の第3図の正規化充電率断面には掘削した坑道およびそれに

よって明らかになった地質を重ねてある。正規化充電率断面より、浅部から深部に至るまで、セリサイト粘土の分布域と正規化充電率の高異常域とが整合的であるという特徴が把握できる。この特徴と対応するような異常は、地中レーダの深度断面でも認められる。地中レーダ探査で検出された不連続面のいくつかが岩盤中の割れ目に対応することや、電極番号12～14付近の反射記録の弱い部分が広く粘土化している部分であることが、地質との比較から確認された。この測線での最大探査深度は4mであった。

4. おわりに

坑内採掘をしているセリサイト鉱山において、地中レーダの坑内探査への適用性を検証する実験を行った。地中レーダ探査から得られた反射記録には、地質境界や不均質構造を示す反射面がいくつも見られた。これらを電気探査の解析結果や坑壁での地質観測と比較したところ、岩質の異なる岩盤の境界や粘土化帯の部分が地中レーダによってよくイメージされることが確認された。探査深度は3～4m程度と小さいが、地中レーダがセリサイト鉱脈の坑内探査に有効な手法であると判断できる。

また、反射記録には岩盤内の割れ目に対応する不連続線が多数検出された。これらの割れ目がもともと存在していたものか、坑道掘削時および掘削後に形成されたものかの判断はできないが、岩盤内にある割れ目は岩盤強度の低下の原因となるので、地中レーダ探査を坑壁の維持・管理の手法に利用できると

いう可能性も示唆される。時間をおいて繰り返し測定を行うことで、坑壁の劣化をモニターできると期待される。

さらに、地中レーダは、探査分解能が高いほか、探査効率が高いという利点もある。たとえば、上述の測線で地中レーダと電気探査の正味の測定時間を比較すると、前者は1～2分間であったのに対し、後者は少なくとも1時間は要した。電気探査は測定準備として電極の接地やケーブルの接続が必要であるので、測定全体に要する時間の差はさらに大きくなる。鉱石を採掘している鉱山など人や車両の往来が多い坑道・トンネルでは、測定時間が短いということは大きな利点になる。調査の目的に応じて手法を使い分ける必要はあるが、今後、高分解能で高効率の地中レーダが坑内探査にもっと利用されても良いと考える。

謝辞：地中レーダの測定実験では、三信鉱工(株)の関係者から多大のご協力をいただいた。ここに記して厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- Geshi, N. (2005) : Structural development of dike swarms controlled by the change of magma supply rate: the cone sheets and parallel dike swarms of the Miocene Otoge igneous complex, Central Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 141, 267-281.
- 岡村優子 (1999) : 愛知県栗代鉱山セリサイト鉱床-セリサイトの特性と利用-, 地質ニュース, no.540, 49-53.
- 高倉伸一・中田孝二 (2006) : セリサイト鉱山の坑壁でのIP法調査-非分極性電極の岩盤への設置方法と正規化充電率による粘土分布の把握-, 物理探査, 59, 363-370.

TAKAKURA Shinichi, SUZUKI Keiichi and NAKADA Koji (2008) : GPR surveys in tunnels of a sericite deposit.

<受付：2007年11月30日>