

石灰岩露岩地域におけるGPR計測

幕内 歩¹⁾・高橋 武春²⁾・濱 友紀²⁾・西山えるむ²⁾・松尾 公一¹⁾

1. はじめに

電磁波を利用する地中レーダ(GPR)探査は、地下水や地表に分布する比抵抗の低い土質地盤(表土)では電磁波が大きく減衰するため、探査深度が数m程度と小さいことが最大の欠点である。一方、露岩地域では、地表から比抵抗の高い岩盤が露出しているため、電磁波が減衰しにくく、通常のGPRでは考えられないような深度まで探査可能である。

本報告では、典型的な露岩地域である露天掘り石灰石鉱山で実施されたGPRの様々な適用事例を紹介する。

「石灰石」は、石灰岩の鉱業用語であり、経済価値を持つ石灰岩の鉱石のことをいう。石灰石は、国内で自給可能な数少ない地下資源であり、日本国内で150を越える鉱山が稼動し(石灰石鉱業協会調査部, 2007)、そのほとんどが露天掘りによる採掘である。石灰石の用途は、セメント原料、鋼鉄、道路やコンクリートの骨材、農業、食品、化学、医薬など、様々な産業で原材料として広く使われている。

露天掘り石灰石鉱山では、安全で計画的な鉱山操業のために、様々な場面において、高精度の地中浅部情報が必要となっている。例えば、

- ・採掘切羽のレベルダウンに伴い、安全確保のための、過去の採掘跡空洞や既存坑道の位置の把握
 - ・切羽の大型化に伴い形成される長大な岩盤斜面(残壁)や採掘切羽の安全性評価のための、亀裂や地質的不連続境界などの把握
 - ・鉱量計算や効率的な採掘のための、地質構造の把握
 - ・新規開発地域のための、表土被り厚さの把握
- などが挙げられる。

これらの情報を提供する有効なツールとしてGPR

が活用されている(例えば、秩父小野田株式会社, 1997; 幕内・松尾, 2002)。石灰岩岩盤という数百 Ωm 以上の高比抵抗で均質な媒質が露出した石灰石鉱山は、電磁波が減衰しにくく、探査深度数十mを確保することが可能である。さらに、露天掘り鉱山という人工構造物や電線などのノイズ源が周囲にない特殊な条件であるため、アンシールドタイプの低周波数アンテナ(100MHz以下)を用いても十分な品質のデータを取得することが可能であり、50mを超える探査深度を実現することができる。露天掘り石灰石鉱山は、GPRにとって最も適しているフィールドの1つと考えることができる。

2. 空洞調査

露天掘り石灰石鉱山では、採掘が進み切羽がレベルダウンすると、過去の坑内採掘跡空洞や既存の坑道などを正確に把握する必要が生じてくる。しかし、過去の採掘記録の中には、図面が紛失している場合や、残っていても確実性がない場合がある。また、崩落の危険性から坑内が入立禁止となっている場合、現状を確認するために坑内に入ることもできないので、地表からの調査が必要となる。石灰岩と空洞の境界では電磁波の明瞭な反射波が特徴的なパターンを伴い発生するので、空洞調査はGPRが最も得意とする調査の1つである。

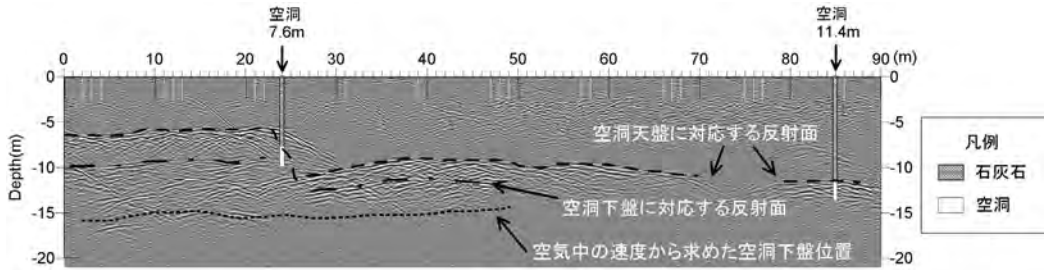
2.1 旧採掘跡空洞調査

かつて坑内掘をしていた露天掘り石灰石切羽内で、旧採掘跡空洞を検出するために100m \times 100mの範囲で、200MHzアンテナを用いてGPR計測を実施した。その結果、第1図の反射記録が示すように、地表下5~10mに旧採掘跡空洞天盤に対応する明瞭な

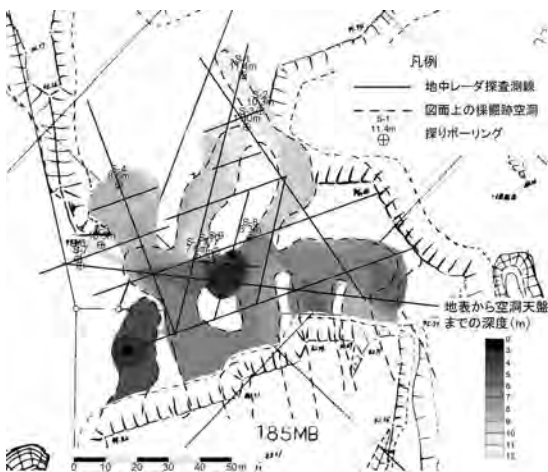
キーワード: GPR, 石灰石鉱山, 空洞調査, 亀裂調査, 地質構造

1) 日鉄鉱コンサルタント株式会社

2) 日鉄鉱業株式会社



第1図 200MHzアンテナによる旧採掘跡空洞調査の反射記録。



第2図 GPRによって推定された空洞上盤深度分布。

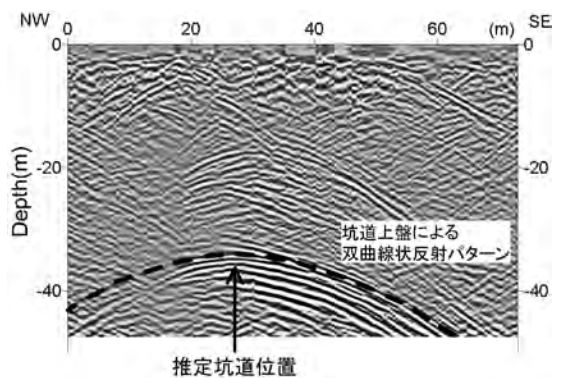
反射面を得ることができた。これらの空洞の存在は、穿孔機による探りボーリングによって確認された。

また、第1図では空洞下盤に対応する反射面も現れている。この反射記録では、石灰岩の電磁波伝搬速度0.106m/nsを用いて深度変換している。反射記録で得られている天盤と下盤の距離を空気中の電磁波伝搬速度0.3m/nsで再計算すると、下盤は第1図中に短破線で示す位置となる。したがって、空洞の大きさ(高さ)は5~10mと見積もられ、現地で確認された結果とほぼ一致した。

本調査によって推定された空洞天盤深度の分布を第2図に示す。この結果から、既存の坑道図では記載されていない採掘跡空洞や、天盤が極めて浅く崩落の危険性のある箇所が抽出され、今後の採掘における留意箇所を見つけることができた。

2.2 坑道調査

切羽のレベルダウンに伴い、縦坑から続くベルトコ



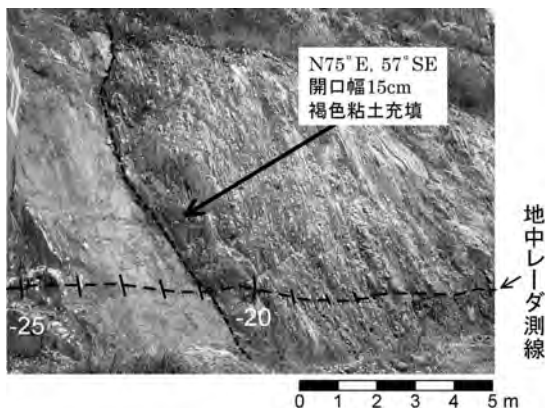
第3図 40MHzアンテナによる坑道調査反射記録。

ンベア坑道(幅4m×高さ3m)の深度を正確に把握する必要が生じた。そこで既存の図面をもとに、坑道を横断する約70mの測線を2本設定し、中心周波数40MHzアンテナによるGPR計測を実施した。

反射記録を第3図に示す。この図より、水平距離30m、地表下35m付近を頂点とする明瞭な双曲線状反射パターンが現れていることがわかる。この反射パターンは坑道に対応すると思われるが、実際に図面から予想される坑道の深度・位置とおおむね一致している。また、この反射パターンは多数の多重反射を伴っているが、これは坑道内部で電磁波が多重反射を起こしているためと推定される。なお、この双曲線状反射パターンの形状から石灰岩の電磁波伝搬速度はおよそ0.103m/nsと見積もられ、第3図ではこの速度を用いて深度変換している。

3. 亀裂調査

露天掘り石灰石鉱山では、切羽の大型化に伴い長大な岩盤斜面(残壁)や採掘切羽が形成されている。安全な生産を継続するためには、岩盤斜面の状態を



第4図 岩盤斜面で確認される亀裂。

把握し、日常的に管理・監視することが必要不可欠である。岩盤内の亀裂や破断面などの不連続境界がどの程度の深さまでどの様に連続しているかという基礎情報の取得を目的に、GPRが利用される。特に粘土などが充填されている開口亀裂は、周囲の岩盤と物性(比誘電率)が異なるため、GPRによって連続性の良い反射面として検出しやすい。

3.1 岩盤斜面における亀裂調査

壁面で確認されている亀裂が、GPRでどの様に捉えられるか測定した。測定個所の写真を第4図に示す。この亀裂は、壁面露出部において褐色粘土が充填された最大15cmの開口亀裂を呈しており、NE方向へ斜面の中に潜り込んでいる。GPR計測は、図中に破線で示す測線に沿って、犬走りレベルより高さ約

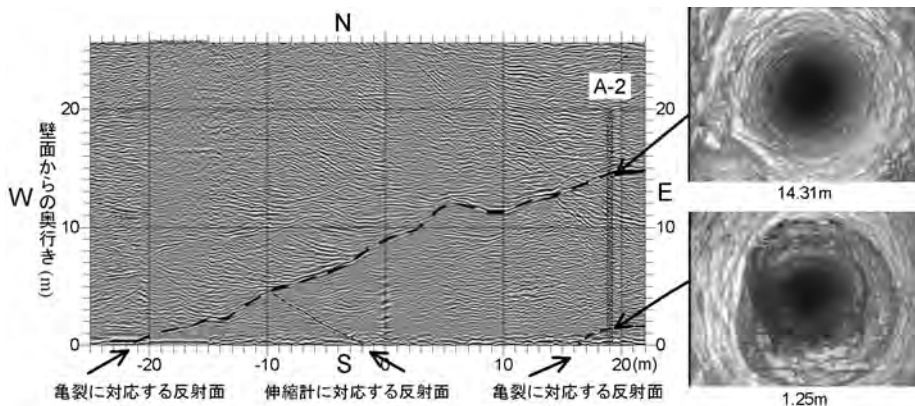
1.2mの壁面に200MHzアンテナを押し当て、壁面に沿って10cmの測点間隔で測定した。

反射記録を第5図に示す。深度変換に用いた電磁波伝搬速度は0.105m/nsであり、それは反射記録に現れた双曲線状反射パターンから求めた。この図で明らかのように、明瞭な反射面が約20°でNE方向に伸びている。A-2孔内をボアホールカメラで観察したところ、その深度付近で孔壁が荒れており、茶褐色の粘土が挟まれている様子が確認された(第5図右上段14.31m)。この計測では200MHzアンテナによって、開口幅数cmオーダーの亀裂については、奥行き(深度)20m程度までは検出可能であると考えられる。

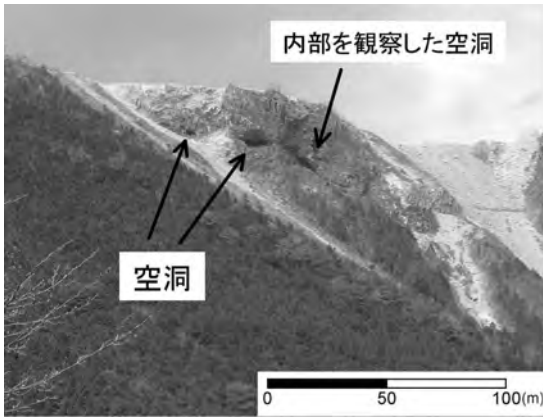
3.2 採掘安全性評価のための亀裂調査

山腹斜面急崖上に空洞が認められる露天掘り石灰石鉱山(第6図)において、空洞から連続する亀裂の分布を把握するため、GPR計測を実施した。空洞は採掘切羽レベルから約30m下にあり、亀裂の方向・傾斜によっては、採掘の際に上部岩塊の滑落等危険を伴う恐れが懸念されていた。

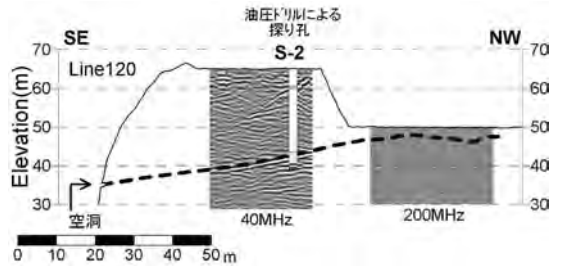
採掘フロア上に測線を設定し、200、80、40MHzのアンテナで測定したところ、深度30m程度まで連続性の良い顕著な反射面が複数検出された。そのうち1枚の反射面は、約20度の傾斜で崖側に伸びており、それを延長すると空洞の深度に対応することが確認された(第7図)。また、この反射面の深度に対応して粘土を挟むゾーンがあることが探り掘りによって確認された。したがって、反射面は岩盤中の何らかの弱線を反映していると考えられ、今後の採掘の際にはその



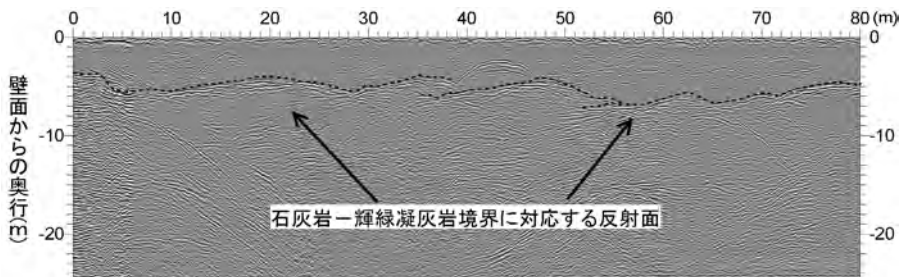
第5図 200MHzアンテナによる石灰岩岩盤中の亀裂調査の反射記録とA-2孔内のボアホールカメラの観察結果。



第6図 山腹斜面急崖上に確認される空洞.



第7図 空洞に直交する方向の断面. 40MHz(左側)及び200MHz(右側)アンテナの反射記録.



第8図 200MHzアンテナによるカバーロック厚さ調査の反射記録.

位置を十分留意する必要があることが示された.

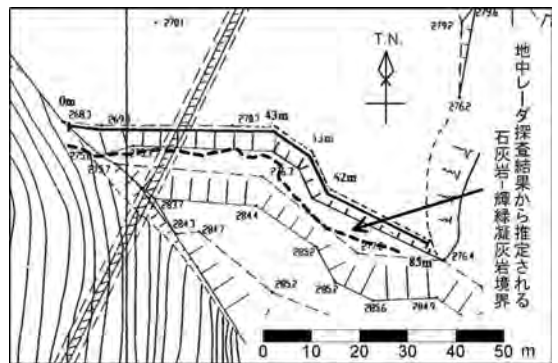
4. 地質構造調査

鉱山においては、鉱量や採掘計画を考える上で、鉱石の分布をはじめとして様々な地質構造を把握することが必要となる。

表土、石灰岩、粘板岩などは、比誘電率や比抵抗がそれぞれ異なるため、GPR計測で求められる地質境界に対応する反射面、あるいは電磁波の減衰の大きさ(反射波の振幅の大小)を指標として区分することが可能と考えられる。

4.1 カバーロック厚さ調査

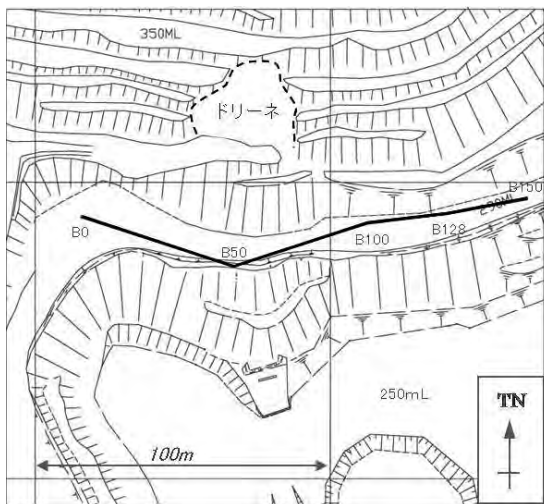
岩盤強度が弱く風化が促進されやすい岩盤が石灰岩の背後に存在する場合、石灰岩をカバーロックとして残した採掘方法が採用されることが多い。石灰岩の背後に輝緑凝灰岩が分布するカバーロック型残壁において、岩盤斜面の安定性を評価するため、GPR



第9図 GPRによって推定された石灰岩-輝緑凝灰岩の境界.

によるカバーロック厚さ調査を実施した。測線は採掘ベンチより高さ約1.2mの残壁面に設定し、200MHzアンテナを残壁面に押し当て、測線に沿って10cmの測点間隔で測定を行った。

反射記録を第8図に示す。深度変換に用いた石灰岩の電磁波伝搬速度は0.102m/nsである。第8図に



第10図 ドリーネ位置及びGPR測線図。

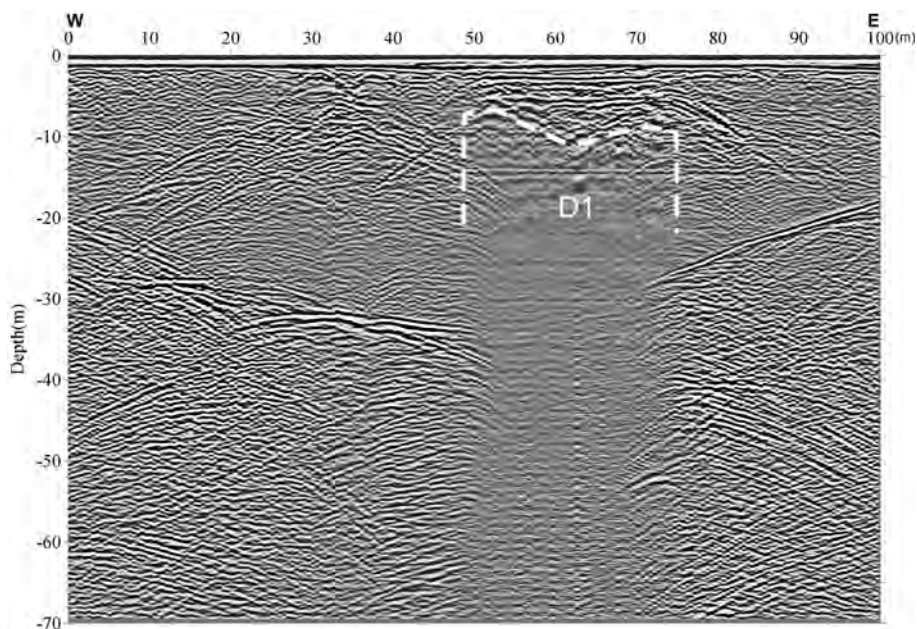
黒破線で示すように、連続性の良い顕著な反射面が奥行き5m前後に現れている。この反射面が、石灰岩-輝緑凝灰岩境界を捉えたものと推定される。壁面の起伏に沿って地形補正した境界を第9図に破線で示す。この反射面は、地質境界の水平距離を示しているのではなく、石灰岩の層厚を示していると考えられるため、水平距離で考えると実際の境界面は若干奥行きが増すと推測される。

4.2 ドリーネ調査

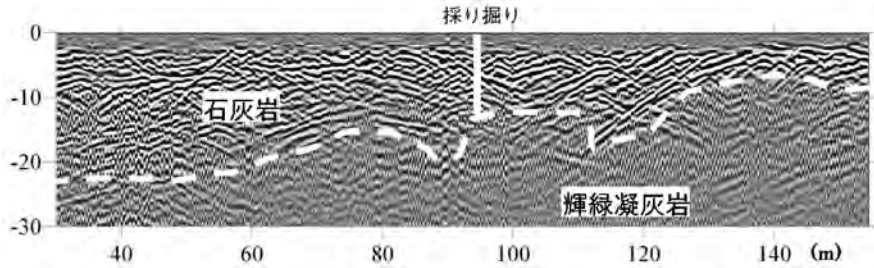
ドリーネは、雨水や地下水により石灰岩が侵食されて出来た凹地形であり、露天掘り石灰石鉱山では、空洞あるいは粘土が充填された空洞として出現する。ドリーネは岩盤中の弱部となり、崩壊などの危険性があるため、安全で効率的な作業のためには、ドリーネの分布・形状を把握する必要がある。

岩盤斜面上に一部露出しているドリーネの形状を把握するため、岩盤内部に埋没しているドリーネ上部の運搬道路上で80MHzアンテナを用いてGPR計測を実施した(第10図)。

反射記録を第11図に示す。深度変換に用いた電磁波伝搬速度は0.102m/nsであり、それはCMP測定から求められた。第11図に白破線でD1と示した範囲は、電磁波が減衰し、反射波がほとんど見られない領域である。このドリーネは、露出部では褐色粘土で充填されていることから、埋没範囲においても粘土が充填されており、低比抵抗の粘土により電磁波が減衰し、このような領域が出現したと考えられる。この領域は反射記録上では深部まで連続しているように見えるが、これは浅部で電磁波が減衰しているためであり、実際に粘土が充填されたドリーネがどの深さまで続いているかの判断はできない。



第11図 80MHzアンテナによるドリーネ調査の反射記録。



第12図 40MHzアンテナによる地質境界調査の反射記録。

4.3 地質境界調査

正確な鉱量計算や効率的な採掘のためには、石灰岩とそれ以外の岩石(粘板岩や輝緑凝灰岩など)の境界を把握する必要がある。石灰岩以外の岩石は、概ね比抵抗が低く、電磁波が減衰するため、反射波の振幅を指標に地質境界調査が可能である。

石灰岩の下部に輝緑凝灰岩が分布すると推定されている採掘フロアで、40MHzアンテナを用いてGPR計測を実施したところ、地表から深度数m~20数mまでは反射波が認められるが、それ以深は急激に反射波がなくなっているという記録が得られた(第12図)。実際の地質構造を確認するために採り掘りをしたところ、反射波がなくなっている深度付近から輝緑凝灰岩が分布していることが確認された。反射記録から推定される石灰岩-輝緑凝灰岩境界を第12図中に白波線で示す。

5. おわりに

高比抵抗で均質な岩盤が露出している露天掘り石灰石鉱山は、電磁波が減衰しにくく、ノイズ減も少なく、GPRにとって最も適したフィールドの1つである。

そのような露天掘り石灰石鉱山におけるGPRの適用事例として、空洞調査、亀裂調査、地質構造調査について紹介した。GPRは安全で効率的な鉱山操業を実施するために有効な情報を提供できるツールであり、今後も操業支援技術の1つとして活用されていくものと期待される。

謝辞: 本報告の各測定実施に際しては、日鉄鉱業(株)の各鉱業所のご協力をいただきました。この場を借りて深く感謝の意を表します。

参考文献

- 石灰石鉱業協会調査部(2007):平成18年度石灰石、ドロマイトの生産・出荷統計分析,石灰石,348,59-80.
 秩父小野田株式会社 津久見工場 津久見鉱業所(1997):採掘切羽の地下空洞探査への地下レーダの導入による保安確保,石灰石,289,8-13.
 幕内 歩・松尾公一(2002):地中レーダ探査の鉱業への適用,資源と素材,Vol.118, No.5,6, 290-296.

MAKUUCHI Ayumu, TAKAHASHI Takeharu, HAMA Yuki, NISHIYAMA Erumu and MATSUO Koichi (2008): Application of GPR at exposed limestone areas.

<受付:2007年11月30日>