

## 地中レーダによる亀裂探査 — 苔の洞門での調査事例 —

The test survey of joints using ground penetrating radar:  
As a case study at Koke-no-domon

高見 雅三・石丸 聡・田村 慎  
Masazo Takami, Satoshi Ishimaru and Makoto Tamura

キーワード; 地中レーダ, シーティング節理, 凍結・融解

Key words; ground penetrating radar, sheeting joint, freezing and thawing,

### I はじめに

北海道において, 1987年6月に上川町層雲峡(天城岩)で, 1996年2月に一般国道229号豊浜トンネル古平本町側坑口付近で, 1997年8月に一般国道229号第2白糸トンネル瀬棚町側坑口付近で大規模な岩盤崩落事故が発生している。岩盤崩落の要因は多様であるがその中の1つとして, 積雪寒冷地での凍結・融解作用が関与していることが知られている。しかし, 崩落と凍結・融解作用(福田, 1980)の関係はまだ未解明な部分が多い。

2001年6月に千歳市苔の洞門で岩盤の一部が崩落した。石丸ほか(2002)は, 崩落状況, 発達史, 崩落の誘因, 気象要素との関係から, この崩落の要因について検討している。その中で, 崩落の要因を明らかにするためには, 目に見えない谷壁面の裏に隠れるシーティング節理(背面亀裂)を確認することが重要であり, 岩盤温度の測定や物理探査などを行い, 亀裂や節理内の水体の成長について解明する必要があると指摘している。

我々はこれらの点を解明するため, 岩盤温度を測定し, 物理探査の中で岩盤内の亀裂探査として有効とされる地中レーダ探査(原ほか, 1983; 新田ほか, 1992; 笹原ほか, 1995; 岡崎ほか, 2003)を採用した。地中レーダ探査は, 亀裂が水みちとなっているなど亀裂周辺の含水率が高ければ, 亀裂調査には非常に有効な手段である。しかし, 亀裂が密着し, 乾いた条件では顕著な反射波は認められないことも知られている(新田ほか, 1992)。

このため, 雨天時に地中レーダ探査を行なえば, 亀裂内に水が流入するため, 亀裂の有無を評価するには有利となるが, 地表面や機器も濡れるため調査が困難となること, また天候に左右されてしまうため, 調査日程を組めないなどの問題も発生する。

積雪寒冷地である北海道では, 融雪が始まり消失するまで長期間, 亀裂等周辺には融雪水が流れ込む条件下にあり, 密着した亀裂内でも地中レーダ探査で有効なパラメータとなる水が存在する, あるいは含水率が高くなっている可能性がある。また, 冬期間, 積雪がな

く外気にさらされる亀裂周辺の水分は凍結することから, 未凍結時の亀裂内には存在しない物性値の異なるものが介在する可能性も高い。

このような観点から我々は地中レーダ探査が効果的に行える最適な調査時期に注目した。本報告では, 北海道のような寒冷環境下にある地域における有効な亀裂評価法の確立を目指し, 2001年に崩落した苔の洞門で岩盤温度測定や地中レーダ探査を行った結果について, 以下に報告する。

### II 調査地の概要と凍結・水分・温度状態

#### II. 1 調査地の概要

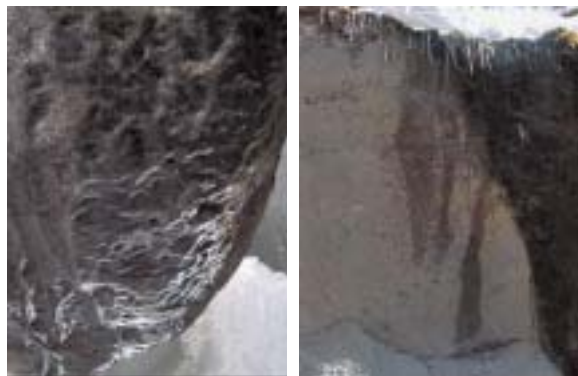
苔の洞門は, 支笏湖の南西, 樽前山の北西に位置し, 1739年(元文4年)噴火のTa-a火砕流堆積物(曾屋, 1971; 古川, 1998)が深く浸食された函型の沢で, 調査地は弱く溶結した溶結凝灰岩の急斜面にあたる。苔の洞門という名称は, 樽前山の支笏湖側山麓を刻む涸れ沢の下流に位置し, 切り立った谷壁に密生するエビゴケ, エゾチョウチンゴケ, ジャゴケなど, 数十種類の苔に囲まれた景観に由来する。洞門内の谷壁には, 数m間隔で垂直に立った節理が発達しており, これらの節理は火砕流堆積直後に火砕流下方向への引張り場で形成された冷却節理とみられる。その多くは火砕流堆積面の傾斜方向に直交して谷地形を横切るもので, 谷の方向の変化には従わない。また, 崩落地点の周辺には, 谷壁斜面に対し垂直方向に引張応力が発生することで形成されたシーティング節理も卓越しており, 上記の垂直節理と交差するものも多くみられる(石丸ほか, 2002)。

#### II. 2 洞門内の凍結・水分状態

凍結期から融雪期を中心に苔の洞門内, 特に節理周辺の凍結・水分状態を観察している。

冬期間, 岩盤表面や洞門内の節理には殆ど氷の形成は見られない。この時期, 降雨がなく, 積雪はあるが融けて水分に置き換わらず, 谷壁の(体積)含水率が5~10%と低いためである。融雪期には融雪水が崖上から谷壁表面や節理内に流れ込み, 壁面では, 外気温

度の低下とともに再凍結し, 谷壁表面を薄い水が覆う様子が多くの場所で観測される(第1図). シーティング節理や洞門内の節理がある壁面では, 亀裂内に入り込んだ融雪水が再凍結し, 亀裂の双方の面から楕円の歯状に成長し, 最終的に完全に水で充滿されている様子が多くの場所で観測される(第2図).



第1図 岩盤表面で再凍結した融雪水  
Fig.1 Refrozen meltwater on rock surface

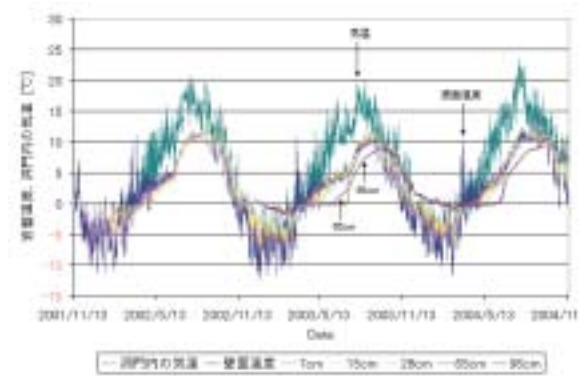


第2図 節理内で再凍結した融雪水  
Fig.2 Refrozen meltwater into joints.

融雪水または降雨水は, 少量の水滴として洞門内に垂れることはあるが, 洞門内の節理から流れ出る, または谷底面を表流水として流れる様子はほとんど観測されていない. 崩落した岩塊の孔隙率を測定した結果, 44.44%と大きく非常に透水性が良いことから, 殆ど水(融雪水や降雨, 地下水など)は岩盤内に浸透し下流に, また一部は洞門の底面に堆積する溶結凝灰岩起源の軽石を含む砂層中を流れるためと推測される.

2001年に崩落した地点で洞門内の気温及び岩盤温度測定を行っている. 第3図に2001/11/13~2004/11/16までの1時間毎の洞門内の気温, 岩盤表面, 深さ7, 15, 28, 65, 96cmの岩盤温度を示す. 岩盤温度は, 洞門内の年平均外温度よりも2.3~2.5°C, さらに北東約9 kmに位置するアメダス観測点の支笏湖畔の年平均気温よりも4.1~4.4°C低い結果を示す.

## II. 3 岩盤温度



第3図 2001/11/13~2004/11/16までの1時間毎の洞門内の気温, 岩盤表面, 深さ7, 15, 28, 65, 96cmの岩盤温度

Fig.3 Hourly mean air temperature and rock temperature of 0, 7, 15, 28, 65 and 96cm depth from Nov. 13 2001 to Nov. 16 2004 in Koke-no-domon.

洞門内の気温は, おおむね-12~21°Cの間を, また, 深さ28cm以浅の岩盤温度は, おおむね±12°Cの間を年周期で振幅する変動を示す. 気温が氷点下を示す期間で, 深さ28cm以浅の岩盤温度は, 気温とはほぼ同様な温度変動を示すが, 深さ65cm以深の岩盤温度は, 気温の変動にはあまり影響を受けずにおおよそ-2~10°Cの間で変動する. なお, 毎年3月下旬頃, 岩盤表面で温度の上昇が見られるが, これは落葉期間の太陽高度の関係で, この時期の正午過ぎのみ直射日光がセンサー部にあたるためである.

地中レーダ探査を実施した融雪期2004/4/22の探査中の気温は3.2~4.9°Cで, 岩盤表面及び7 cmは融解し, 15cm~96cmは-0.3~0.0°Cで凍結している状態である. 一方, 初冬期2004/11/16の探査中の気温は0.1°C程度で, 岩盤表面は部分的に凍結が見られるほかは, 深さ7cm~96cmは0.7~6.9°Cを示し, 未凍結状態である.

## III 地中レーダの探査原理と使用機器

地中レーダ探査は, 地表から地中に向けて電磁パルス波を放射し, その反射波を捉えることによって地中浅部の地盤構造や空洞, 埋設物などを非破壊的に探査する物理探査法の1つである(物理探査学会, 1998). 地中レーダの測定方法は, 主としてワイドアングル測定とプロフィール測定がある.

### III. 1 ワイドアングル測定

ワイドアングル測定は, ある1点を中心に送信アンテナ(Tx)と受信アンテナ(Rx)をそれぞれ反対方向に移動させるCMP(Common Mid Point)と, 送信アンテナを固定し, 受信アンテナを徐々に広げなが

ら測定するWARR (Wide Angle Reflection and Refraction) の2つの方法がある。これらの方法により、横軸が水平距離、縦軸が反射往復時間からなる反射記録が得られ、傾きから送・受信アンテナ間の空中または地中を伝搬した直接波や地中からの反射波などの電磁波伝搬速度を求めることができる。

### III. 2 プロファイル測定

プロファイル測定は、送信アンテナ (Tx) と受信アンテナ (Rx) の間隔を一定に保ったまま測線に沿ってアンテナを移動させながら測定する方法である。この方法により横軸が水平距離、縦軸が反射往復時間からなる反射断面記録が得られ、測線下の空洞や亀裂などの地下構造が把握することができる。一般にアンテナから送信される電磁波はある一定の角度の範囲で発信されるため、地表に開口した鉛直方向の亀裂を横断する場合は、 $\wedge$ 状の反射断面が、また地中に空洞などがある場合は、 $\cap$ 状の反射断面として検出されることがある。これらを補正するためにマイグレーション処理等を行う場合もある。

### III. 3 使用機器

本調査では、カナダSensors & Software Inc社製pulseEKKO 1000A GPR systemを用いた。一般にシールド型のアンテナは、送・受信アンテナが一体となっている場合が多いが、本システムの特徴は、シールドアンテナでかつ送・受信アンテナを分離できる点である。このため、1つの周波数のアンテナで上記で示したプロファイル測定とワイドアングル測定ができる。

探査には、探査深度や開口亀裂幅などから450MHzと900MHzの2種類のアンテナを用いた。データ収集とコントロールには、DVL (Digital Video Logger) 装置を、データ回収には、同社のWinPXFERを用いた。解析にはノート型のパーソナルコンピュータとGeo-Pros社製の地中レーダデータ解析処理ソフトウェアRADPRO Ver 3.4を用いた。

## IV 地中レーダ測定結果

探査測線は、2001年に崩落した地点を挟んで全長約18m、底面から約1.5mの高さの谷壁面上とした。測線の基点から下流に向かって2.4m, 5.9m, 9.8m, 13.2m, 16.3mの位置に洞門内の節理が存在することを確認している。なお、これらのうち9.8m, 13.2mの節理は数cm程度開口しているが、他は密着している。

### IV. 1 ワイドアングル測定

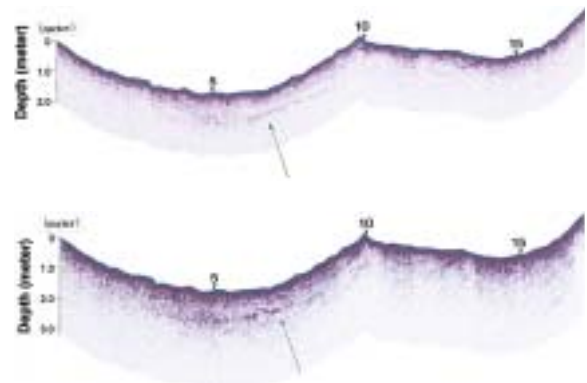
融雪期2004/4/22と初冬期2004/11/16に実施した450MHzのワイドアングル測定 (WARR) から、電

磁波伝搬速度を求めた結果、直接波はともに約290 m/ $\mu$ sec, 第一層は125m/ $\mu$ secと65m/ $\mu$ secが得られた。第3図に示した岩盤温度の結果から96cmまで水点下であること、永久凍土内の電磁波伝搬速度は、凍結した方が速いと報告されている (Rozenberg et al, 1984; Andersland and Ladanyi, 1994) こと、さらに電磁波伝搬速度から各調査日の比誘電率  $\epsilon_r$  を求めた結果、融雪期は5.8で凍土程度、初冬期は21.2で湿潤砂程度の結果 (物理探査学会, 1989; 笹原ほか, 1995) が得られたことから、第一層の速度の相異は、岩盤内の水の凍結によるものと推測される。

### IV. 2 プロファイル測定

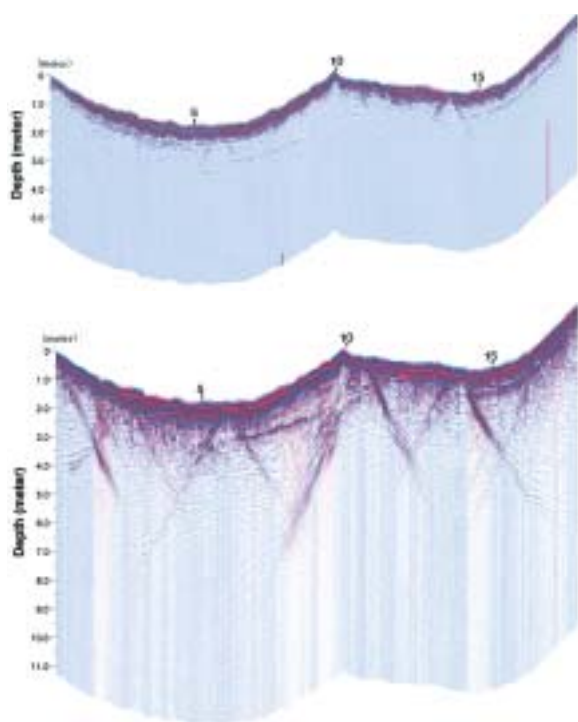
通常、プロファイル測定で得られる測定記録は時間断面であり、深度に換算するためには、岩盤内における電磁波伝搬速度を求める必要がある。ここでは、上述したワイドアングル測定で得られた第一層の電磁波伝搬速度を用いて、深度断面を作成した。なお、マイグレーションなどの処理は行っていない。

第4図に初冬期の、第5図に融雪期の900MHz, 450MHzのアンテナを用いた深度断面をそれぞれ示す。測線は左 (上流) から右側 (下流) に約18mで各図の上側が洞門内の通路、下側が谷壁を示し、谷壁を測線に沿って水平に切り取った状態を上から見た図を示す。



第4図 初冬期のプロファイル測定記録 (上) 900MHz (下) 450MHz (矢印は背面亀裂を示す.)  
Fig.4 Records of profile measurement (Upper) 900MHz (Lower) 450MHz for early winter. (The arrow shows the back crack.)

第4図において、崩落直下の測線5~8m付近で深さ60~80cmにシーティング節理 (背面亀裂) と思われる連続した反射 (矢印) が、また測線9.8m付近にも節理と思われる連続的な反射が検出される。しかし、測線上で確認されている全ての節理に対応する反射は顕著ではない。初冬期の探査時では洞門内の節理から湧水などは確認されておらず、亀裂が密着し、乾いた条件では顕著な反射波は認められない結果 (新田ほか, 1992) と一致する。



第5図 融雪期のプロファイル測定記録900MHz (上)  
450MHz (下)

Fig. 5 Records of profile measurement (Upper) 900 MHz (Lower) 450MHz for spring snowmelt period.

第5図の融雪期では、全般に連続的に強い反射が60～100cm程度の深さで見られる。岩盤温度、電磁波伝搬速度、比誘電率から凍結面(線)を示していると思われる。

一方、この時期では、洞門内の節理が確認されている場所(測線2.4m, 5.9m, 9.8m, 13.2m, 16.3m)付近では明瞭な反射波が捉えられている。崩落直下の測線5～12m付近, 14～17m付近にはシーティング節理と思われる反射やさらにそれと他の節理と交差している様子までも明らかに確認できる。この時期の壁面観測では融雪水が岩盤表面を流れる様子・再凍結した状態(第1図)や、洞門内の節理内で融雪水が再凍結した水体の存在が確認されている(第2図)。

特に、融雪期では融雪水が節理や亀裂内に流れ込みやすい環境にあり、また流れ込んだ融雪水が再凍結し水体が不透水となりさらに周辺の含水率を高める。このような環境は降雨時のような一過性ではなく、少なくとも融雪が完了するまで長期間続くことから、積雪寒冷地域における地中レーダによる亀裂評価は、融雪期に行うことが最適であると結論づけられる。

## V 今後の課題

初冬期と融雪期の探査結果から、融雪期に探査を行

うことは亀裂評価を行う上で非常に有効であると上述した。高見ほか(2002), Andersland and Ladanyi(1994), Rozenberg et al(1984)により、0℃前後で凍土の抵抗値や弾性波速度が極端に異なること、また荒木(1898)により、地中レーダと密接に関係する誘電率の周波数及び温度依存性が明らかにされている。しかし、洞門内の節理等で水体の形成が確認されていない厳寒期については不明な点がある。地中レーダ法による亀裂評価を確立させるためには、今後、厳寒期において測線上の節理の反射の有無、浅層の強反射と凍結線との関係、さらに降雨直後と融雪期の結果比較など確認する必要がある。

また、電気探査のような透過型の探査手法と併用し、地中レーダ探査の有効性を確認するとともに、深部の節理やシーティング節理の分布や状況を把握する課題は残されている。

さらに、積雪寒冷地に関連する岩盤崩落のメカニズムを解明するためには、崩落した岩盤の凍上性判定や不凍水の存在を確認する必要もある。

これらの課題については、今後、取りまとめ報告する予定である。

## VI まとめ

これまでの結果を要約すると、以下のとおりまとめられる。

- (1) 岩盤温度測定の結果から深さ96cmの岩盤温度は、融雪期でも氷点下を示し、また、融雪期のみ洞門内の節理内で水体の形成が確認された。
- (2) 2001年の崩落地点周辺で地中レーダ探査を実施した。初冬期の測定では側線上で目視できる節理でも反射は明瞭ではなかったが、融雪期の測定では側線上の節理やシーティング節理の存在、さらにシーティング節理と他の節理が交差していることも明確に捉えることができた。
- (3) これは、節理内に流れ込んだ融雪水や、あるいは融雪水が節理内で再凍結し、さらにそれが不透水層となり節理周辺の含水率を高め、それらがいわゆる造影剤のような役目を果たしたためと考えられる。
- (4) ここで報告した結果は、未凍結期と融雪期のみであるが、いまのところ、積雪寒冷環境にある地域においては、亀裂評価を行う上で、少なくとも融雪期に地中レーダ探査を行うことにより、亀裂や節理等の存在を有効かつ効率よく把握できる結論づけられる。

## 謝辞

千歳市産業振興部観光水産課をはじめとして、林野庁石狩森林管理署支笏湖森林事務所、環境省自然環境局支笏湖自然保護官事務所の方々には調査に際して様々なご配慮を頂いた。また、(株)テラの三浦秀敏氏、早川

敏寛氏には地中レーダ探査装置の指導を、(株)ジオテックの堀田 淳氏、川村 晃氏には、解析においてご指導を頂いた。以上の方々に謝意を表します。

## 文 献

- Andersland, O. B. and Ladanyi, B.(1994) : An Introduction to Frozen Ground Engineering, CHAPMAN & HALL, 23-62.
- 荒木寿夫 (1989) : 凍土の誘電的性質の研究, 北大大学院環境科学研究科環境保全学専攻凍土部門修士論文, 1-16.
- 物理探査学会 (1998) : 物理探査ハンドブック手法編, 第7章 地中レーダ, 401-429
- 古川竜太 (1998) : 樽前火山 江戸時代の破局的噴火と生々しい溶岩ドーム, 北海道の火山, 築地書房, 77-91.
- 福田正己 (1980) : 凍結-融解による岩石の破碎機構論, 地形, 1, 89-95.
- 原 徹夫・坂山利彦 (1984) : 地盤調査に対する地下レーダの適用性について, (株)応用地質調査事務所年報, 5, 79-91.
- 石丸 聡・高見雅三・岡 孝雄 (2002) : 2001年6月に発生した「苔の洞門」の谷壁岩盤崩落, 北海道立地質研究所報告, 73, 209-215.
- 新田邦弘・笹原克夫・土田庸夫・利岡徹馬 (1992) : 地下レーダによる岩盤内部の割れ目調査例, 物理探査学会第86回 (平成4年度春季) 学術講演会講演論文集, 321-325.
- 岡崎健治・伊東佳彦・土田庸夫・濱田正志 (2003) : 導電性微粒材を用いた地下レーダによる亀裂の検出実験について, 日本応用地質学会北海道支部平成15年度研究発表会講演予稿集, 23, 17-20.
- Rozenberg G., Henderson J. D., Sartorelli A. N. and Judge A. (1984) : Some aspects of transient electromagnetic soundings for permafrost delineation, Workshop on permafrost geophysics, Special Report 85-5, 75p.
- 笹原克夫・山本浩也・土田庸夫 (1995) : 地下レーダによる岩盤斜面内の亀裂探査に関する実験, 物理探査学会第92回 (平成7年度春季) 学術講演会講演論文集, 6-10.
- Sensors & Software Inc. (2002) : EKKI-for-DVL pulseEKKO 1000 User's Guide Version 1.0. 1-94.
- 曾屋竜典 (1971) : 樽前火山の形成-とくにTa-a, Ta-b期の活動について-. 火山, 16, 15-27.
- 高見雅三・土谷富士夫・後藤典俊・武藤 章・吉田 透 (2002) : 季節凍土における電気探査-比抵抗法における凍結・融解過程及び凍結深さの簡易解析-, 物理探査, 55, 6, 523-536.