

令和元年6月26日現在

機関番号：10106

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K20886

研究課題名(和文) 岩盤水分量の定量化手法の確立と寒冷地岩盤における水分挙動の解明

研究課題名(英文) Establishment of quantification method for rock moisture content and monitoring of rock moisture behavior in cold region

研究代表者

渡邊 達也 (Watanabe, Tatsuya)

北見工業大学・工学部・助教

研究者番号：80636168

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：地中レーダー探査を利用して、積雪寒冷地の岩盤斜面内部の水分量定量化と季節変化のモニタリングを実施した。電磁波伝搬速度-比誘電率-体積含水率の関係式を用いて、岩盤斜面の表層から深さ1.5 mまでの水分量分布を導出した。電磁波伝搬速度分布は、未凍結期と凍結期とで大きな違いを示した。これは岩盤内部の間隙水が凍結したことによる比誘電率の変化を反映している。定量化の精度向上へ課題を残しているが、電磁波伝搬速度の季節的变化から凍結破砕の生じる最大深度や程度の推定が可能であろう。

研究成果の学術的意義や社会的意義

積雪寒冷地では凍結破砕や凍上といった寒冷地特有の現象によって岩盤が劣化し、落石や崩壊が発生する。これらの現象には岩盤内部に存在する水分が関与しているが、その実態を直接的に計測することは困難であった。本研究では、水分の多寡に影響を受ける物理量である電磁波伝搬速度を利用することで、岩盤斜面内の水分分布を定量化し、季節的变化を捉えることができた。今後、測定法の効率化等を検討し、岩盤・地盤性状を非破壊的に調査するパラメーターとして活用していく。

研究成果の概要(英文)：Quantitative monitoring of water content in rock slopes in snowy cold region was surveyed using ground penetrating radar. The distribution of water content up to 1.5 m depth was calculated using the relational expressions between electromagnetic wave propagation velocity, relative permittivity and volumetric water content. The profile of electromagnetic wave propagation velocity showed a large difference between the unfrozen and frozen periods. This reflects the change in relative permittivity due to freezing of pore water in the bedrock. Although problems remain to improve the accuracy of quantification, it will be possible to estimate the depth and intensity of frost shattering from the seasonal change of electromagnetic wave propagation velocity.

研究分野：地形学

キーワード：凍結融解 岩盤 地中レーダー

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

積雪寒冷地域の岩盤斜面では、融雪期や厳寒期に落石や表層崩壊が多数発生する。これらのイベントは、凍結破砕、凍上など寒冷地特有の物理破壊現象で引き起こされるが、これら現象の発現には水分の存在が欠かせない。ゆえに、凍結前の高い水分飽和度や凍結進行過程や融解期における岩盤内部の水分移動が岩盤の物理的破壊に関与していると考えられるが、岩盤内部の水分挙動を実測した例は非常に少ない。岩石の凍上現象に関しては、飽和条件下での室内試験による報告が多くあるものの、自然条件下で室内実験と同等の飽和状態が起こりえるのかという疑問点がある。しかし、これまでの寒冷地の岩盤斜面を対象とした現地観測事例では、岩盤の破砕・変形や落石の発生期と温度条件の対応関係が議論の中心となり、水分状態に関する議論は極めて少ない。

寒冷地の岩盤斜面内部の水分状態に関する情報が少ない理由として、岩盤内部の水分量を非破壊かつ定量的に計測するモニタリング手法が確立されていないことが挙げられる。土壌を対象とした水分モニタリングには、電磁波伝播速度と誘電率、水分量の相関関係を利用した TDR (Time-domain reflectometry) 法が広く普及しているが、岩盤斜面内に TDR センサーを埋設することは困難であり実用的でない。

岩盤水分量を非破壊かつ定量的に計測する手法として、地中レーダー探査機の適用が挙げられる。地中レーダー探査は、地中に発した電磁波の反射波形と走時から内部構造を把握する手法である。地中レーダー探査の探査手法には、送受信アンテナ間隔を固定し、電磁波の反射波形から内部構造を可視化するプロファイル法と、送受信アンテナ間隔を変化させ、共通反射点からの反射往復時間から地盤中の電磁波伝播速度の変化を求めるワイドアングル法がある。ワイドアングル法で電磁波伝播速度を算出すれば、TDR 法と同じ原理で地盤水分量の計測が可能である。電磁波伝播速度の変化は誘電率に強く依存するので、誘電率と岩石水分量の関係を明確にすれば、地中レーダー探査法が寒冷地岩盤斜面の水分挙動を捉える有用な手法になることが考えられる。

2. 研究の目的

上記背景をもとに、本研究では地中レーダー探査法による岩盤斜面内部の水分量の非破壊的定量化を試み、特に寒冷地岩盤斜面の凍結期直前から融解期に注目して水分量の変化をモニタリングする。そのためには、岩盤中の電磁波伝播速度と水分量の関係式が必要であることから、調査対象岩盤に適した関係式の導出を行う。また、調査対象岩盤の地温、凍上量といった観測データと統合的な分析を行い、凍結進行や凍上発生時の岩盤水分挙動を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

北海道北見市内の凝灰岩質岩盤斜面 (図 1) を対象として現地観測を行った。斜面を構成する凝灰岩の乾燥密度は $1.0\text{--}1.1\text{ g/cm}^3$ 、空隙率は 30% 前後であり、表面付近は風化により破砕が進行している。観測斜面では、複数の温度センサーを配置した温度計測ロッド (0.15 m 間隔で最大深度 1.50 m)、凍上量計を設置して、岩盤内部の温度変化と岩盤表面の変位を並行して観測した。

地中レーダー探査に使用した機材は Pulse Ekko 1000 (Sensors & Software 社製) で、送受信アンテナには周波数 450 MHz と 900 MHz を適用した。岩盤にこれらのアンテナ周波数を適用した場合の鉛直解像度はそれぞれ約 10 cm と約 5 cm 程度である。探査は地盤凍結が始まる前の晩秋から春先の融解期の間を対象に、3 週間に 1 回程度のペースで実施した。岩盤斜面に予め測定点を設定し、そこを中点として、送受信アンテナを左右両方向へ 5 cm 刻みで遠ざけながらデータを取得した。

データ解析には物理探査解析ソフトウェア Reflexw を使用した。横軸がアンテナ間隔、縦軸が反射往復時間のグラフには、誘電率が変化する境界から形状の異なる地中反射波が放物線状に描かれ (図 2)、それぞれの形状から地中を伝播する電磁波の速度変化を求めた。そして、電磁



図 1. 調査対象岩盤斜面

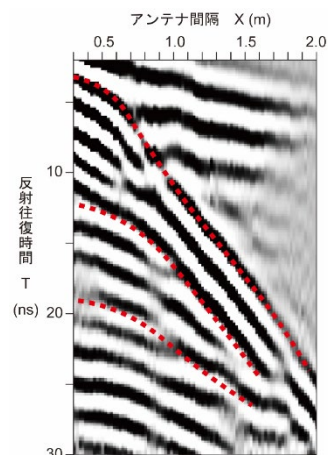


図 2. ワイドアングル法による取得データ

波伝播速度—誘電率—体積含水率の換算式を用いて、岩盤水分量のプロファイル図を作成した。

4. 研究成果

調査初年度 11 月～4 月における調査対象岩盤斜面の地温、凍結深度、凍上量のデータを図 3 に示す。岩盤斜面は南向きで日当たりが良いため、無積雪期や調査による除雪直後は地表面温度の振幅が非常に大きい。晩秋や初春には日周期の凍結融解が繰り返り起こり、厳冬期においても直射日光が当たると地表面では融解が生じる。季節的凍結は 12 月中旬頃から始まり、最大凍結深度は 2 月中旬に約 45 cm まで達した。その後、最大凍結深度の減少と融解前線の進行に伴い、3 月中旬頃には季節凍結層は深度 30 cm 付近のみとなり、3 月末までに完全に消えた。厳冬期の最低地温は地表面で -10°C を下回り、15 cm 深で -5.4°C 、30 cm 深で -2.0°C 、45 cm 深で -0.1°C であった。

凍上量計のデータには、5 mm 程度の急激な変位が 11 月末と 1 月下旬に生じたが、これらは積雪荷重の影響によるものである。凍上現象による変位は、季節的凍結が始まった 12 月中旬頃から非常にゆっくりとした速度で生じ、最大凍上量は約 1 mm 程度であった。

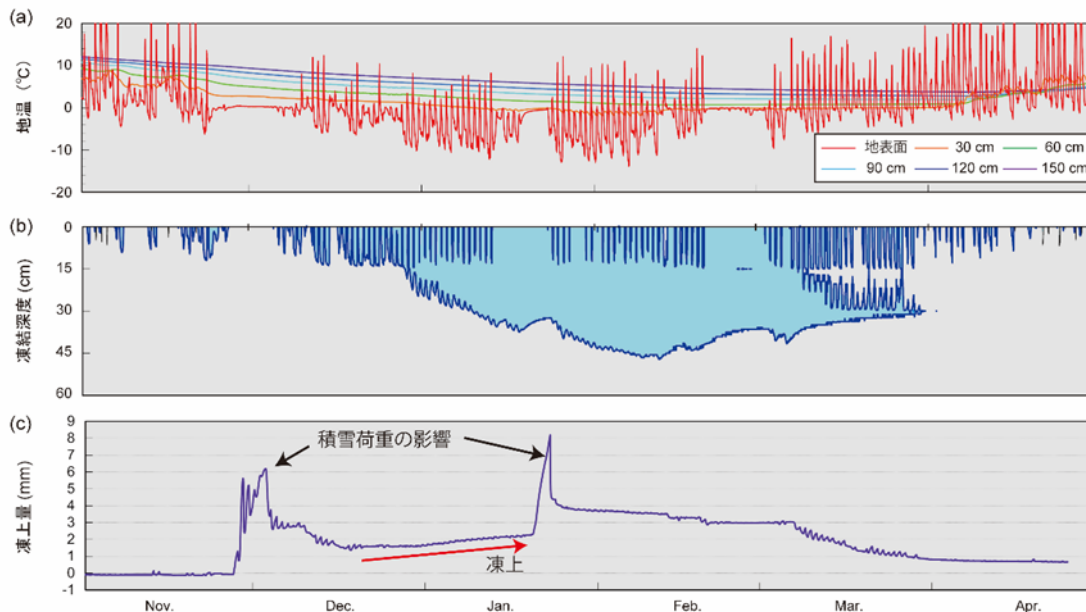


図 3. 11 月～4 月における調査対象岩盤斜面の(a)地温、(b)凍結深度、(c)凍上量

地中レーダー探査で計測した岩盤斜面内部の電磁波伝播速度構造の変化について、アンテナ周波数 450 MHz で得られた結果を図 4 に示す。周波数 450 MHz では鉛直解像度約 10 cm でデータが得られるものの、逆に波形が減衰しやすいため、最大探査深度は約 1.5 m であった。季節的凍結開始前の速度分布は、表面付近で約 0.85 m/ns と低いが、深度と共に増加して、0.9 m 以深では約 1.10 m/ns となる。季節的凍結が進行した 1 月 13 日には、表層部で 1.12 m/ns と急激な速度上昇を示した。速度は深度と共に漸減して、深度 0.4–0.6 m にかけては約 0.82 m/ns まで低下、それより以深では上昇して、約 1.05 m/ns で一定であった。その後、季節的凍結の期間は、表層部付近の電磁波伝播速度は約 1.05 m/ns で推移し、深度と共に緩やかに速度低下する傾向を示した。凍結層が消失した 3 月 29 日の探査結果では、季節凍結開始前と同様に表面付近は低速度（約 0.9 m/ns）で、深さ共に増加し、0.7 m 以深では約 1.12 m/ns となった。

次に、電磁波伝搬速度から岩盤水分量を算出した。まず、電磁波伝搬速度 V と誘電率 ϵ_r には以下の関係式が成り立つ。

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

ここで、 C は真空中の電磁波伝搬速度 (3.0 m/ns) である。岩盤は誘電率の異なる空気 ($\epsilon_{\text{air}}=1$)、水 ($\epsilon_{\text{water}}=81$)、鉱物粒子 ($\epsilon_{\text{solid}}=4\sim 5$) から構成されるため、岩盤の誘電率はこれらの体積比率で決まる。

$$\sqrt{\epsilon_r} = (n - \theta_v)\sqrt{\epsilon_{\text{air}}} + \theta_v\sqrt{\epsilon_{\text{water}}} + (1 - n)\sqrt{\epsilon_{\text{solid}}} \quad (2)$$

ここで、 n は間隙率、 θ_v は体積含水率である。式 (1) に式 (2) を代入し、調査対象岩盤の間隙率を入力すれば、電磁波伝搬速度を体積含水率に換算することができる。

図 4 において、電磁波伝搬速度分布を体積含水率に換算した結果、岩盤水分量は 6～33% の範囲に収まり、深さ方向へ変化すると共に、季節的な変化も生じていることが見て取れる。未凍結期は、表層付近で 30% 前後の高い値を示すが、深さと共に減少し、0.8 m 以深では 10～14% 程度まで低下する。一方、凍結期は凍結状態にある表層部はせいぜい 10% 強と低くなり、深部の方が

やや高い傾向となる。このような季節的な変化は、間隙に存在する水が凍結して誘電率の低い氷 ($\epsilon_{ice}=4.2$) へと相変化したと考えるのが妥当である。すなわち、岩盤の凍結破砕を引き起こす間隙氷の体積膨張やアイスレンズの形成が生じていることが示唆され、実際に岩盤の凍上もこの時期に観測されている (図 3c)。

未凍結期における表層付近の水分量は、飽和に近い値を示した。岩盤表層部は風化による破砕が進行していることから、雨水や融雪水が容易に浸透・保持されやすいことが一因として考えられる。ただし、破砕の進んだ表層部は間隙率が未風化部分よりも大きくなっており、間隙率 30% として算出した体積含水率は実際よりも過大評価してしまっている可能性がある。岩盤内部は、亀裂の分布や岩相の変化などで不均質である。そのため、より正確に岩盤水分量を定量化するためには、岩盤内部構造の変化を考慮し、換算式に入力するパラメーター値を変更しながら計算する必要がある。

本研究では、地中レーダーを使用した非破壊計測による岩盤水分量定量化を試みた。その結果、電磁波伝搬速度から岩盤斜面内部の水分分布の傾向が把握できた。また、未凍結期と凍結期とでは速度構造に大きな変化が認められ、間隙水の凍結による水分量変化が捉えられた。このような変化は、凍結破砕の強度や発生深度を推定する指標にもなるであろう。定量化の精度向上や測定方法の効率化などまだ課題が残るが、今後、電磁波伝搬速度を利用した岩盤・地盤性状の推定手法を確立していきたい。

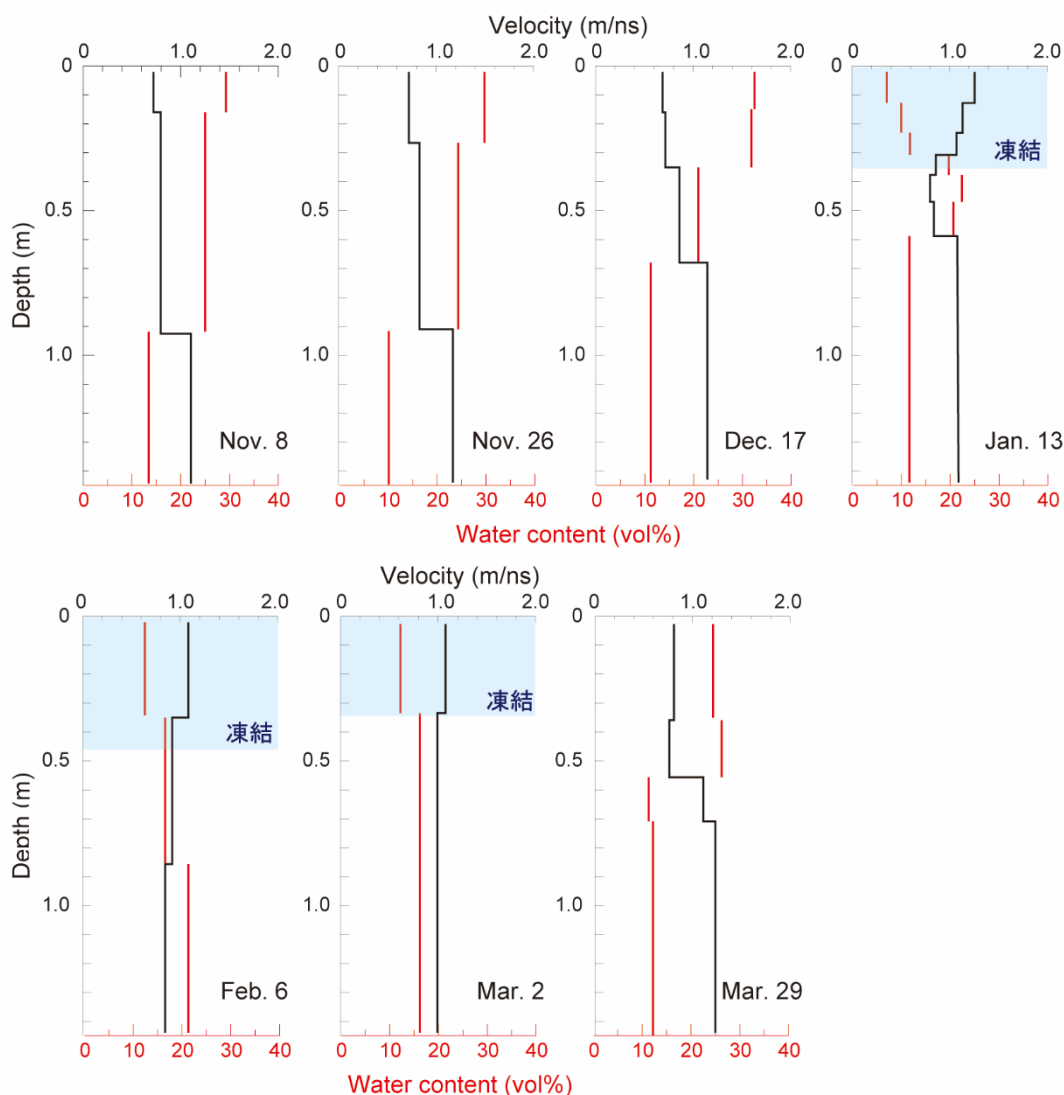


図 4. 調査対象岩盤斜面の電磁波伝播速度と体積含水率の深度プロファイル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 1 件）

渡邊達也、中村大、北海道北見市の岩盤斜面を対象とした表層環境モニタリング、日本地形学連合 2018 年秋季大会。

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8 桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。