

水蒸気の凝集・凍結にともなう岩の破砕

Frost Deterioration of Rocks with Condensation of Water Vapor

○渡辺晋生*1・三輪睦実*2
Kunio Watanabe, Mutsumi Miwa

1. はじめに

土や岩のような多孔質体が多量の水を含み凍結すると、間隙水の凍結膨張やアイスレンズの析出により、多孔質体が脆弱化あるいは破砕することがある。こうした凍結破砕機構の理解は、寒冷環境下にある土構造物の管理や岩窟遺跡の保全を考える上で重要である。岩の凍結破砕の発現条件には、岩質、温度環境、初期水分量と水分供給条件があげられる。すなわち、岩の凍結破砕の抑制には岩への水分供給の制御が有効である。自然環境下では、凍結にともなう岩への水分供給経路として、地下水からの毛管上昇、雨水や融雪水の浸透、水蒸気の凝集などが考えられる。これまで、凍結過程にある土中の液状水移動やアイスレンズの成長と吸水に関する研究は多くなされているが、水蒸気移動や凝集に着目した土の凍結の研究例は少ない。そこでここでは、周期的な温度変化に晒される岩への水蒸気の凝集と凝集水の凍結による岩の破砕機構を実験的に明らかにし、凍結破砕の抑制例を検討した。

2. 試料と方法

鳥取砂丘砂と藤の森シルトを様々な比率で混合し 700 °C で 4 時間素焼きした石と、凝灰岩、風化凝灰岩、軽石を試料に用いた。試料を 4 cm 四方、2 cm 厚に整形した。シルトのみを素焼きした石とその他の岩試料の乾燥密度は 1.52, 1.75, 1.22, 0.57 g/cm³, 間隙率は 0.42, 0.34, 0.47, 0.79, 飽和透水係数はそれぞれ 2.9, 0.66, 20, 95 cm/d だった。風乾した試料の底面以外にエポキシ系の防水剤を塗布した。そして、試料底面に水蒸気は透過するが液状水は透過しないアルコキシラン系封孔剤を塗布した試料と、非塗布の試料を用意した。

16.5 × 24.5 × 26.5 cm の断熱容器を上下層に仕切り、試料を底面が下層に、上面が上層に晒されるように設置した。断熱容器の下層には試料底面からの距離が 2 cm になるように水を張り、ヒーターを用いて任意の水温を維持した。そして、容器上層の気温をベルチェ冷却器で周期的に昇降した (4 h 昇温, 20 h 冷却)。その際、上層の気温、試料上面および底面の温度、水温を熱電対でモニターした。また任意の時間に試料の質量を測定し、試料の飽和度を算出した。全ての測定は 2 °C の低温室で行った。

3. 結果と考察

断熱容器下層の水温を 0 °C に保ち、試料上面に 3.1 ~ -9.2 °C の温度振幅を与えると、試料底面の温度は 2.4 ~ -5.9 °C で振幅し、冷却時の岩中の平均温度勾配は 1.5 °C/cm となった。また水温を 35 °C に保ち、試料上面に 9.8 ~ -4.3 °C の温度振幅を与えると、試料底面の温度は 24.4 ~ -1.2 °C で振幅し、冷却時の岩中の温度勾配は 2 °C/cm となった。このときのシルトのみを素焼きした石の飽和度の変化を図 1 に示す。水温を 0 °C に保つと、封孔剤非塗布試料 (液状水も水蒸気も浸透できる試料) の飽和度は 0.008/d で微増した。上面冷却時に底面に霜が生じ試料重が増加したが、この霜は昇温時にほぼ全て昇華し、岩の

吸水はあまり見られなかった。封孔剤塗布試料 (水蒸気のみ浸透できる試料) についても飽和度が 0.01/d で微増したが、非塗布試料との差はほとんど見られなかった。いずれの試料も飽和度は 0.1 に満たず、凍結破砕は生じなかった。水蒸気圧差が小さい場合、大気から岩中への水蒸気移動や結露はほとんど生じず、冷却時に岩表面に凝結した水も融解して浸透することなく昇華すると考えられる。

断熱容器下層の水温を 35 °C に保ち水蒸気圧差を大きくすると、封孔剤非塗布試料の水分量は温度の昇降サイクル毎に増加した。飽和度の増加速度は平均で 0.35/d であり、冷却時より昇温時に速く、飽和度の増加にともない遅くなった。また、飽和度が 0.8 を越えた冷却 2 サイクル目には試料にひびが入り、飽和度が 0.9 を以上となった 3 サイクル目には、先に生じたひびにアイスレンズが成長し、試料が破砕した。同様の水分増加は他の岩試料でもみられた。風化凝灰岩については、冷却 4 サイクルで飽和度が 0.7 に達し、試料にひびが生じた。軽石については飽和度があまり増加せず、凝灰岩については飽和度は増加したが、いずれも数十回の温度サイクルではアイスレンズの発生や破砕は生じなかった。一方、封孔剤塗布試料 (水温 35 °C) については、冷却時に底面への着霜による試料重増加が確認できたが、昇温時の飽和度の増加はほとんど見られなかった。凍結融解を 3 サイクル経ても飽和度は 0.2 程度であり、凍結破砕は生じなかった。これは他の岩試料についても同様であった。岩表面の温度の昇降が繰り返されても、岩中への水蒸気による水の浸透はほとんど生じないと見せる。すなわち岩の水分増加は岩表面に結露した水や凝結後融解した水の浸透によると考えられ、こうした液状水の浸透を妨げる封孔剤は、岩の凍結破砕抑制に有用といえる。

謝辞

アルコキシラン系封孔剤を提供していただいた株式会社ディ・アンド・ディに感謝の意を表します。

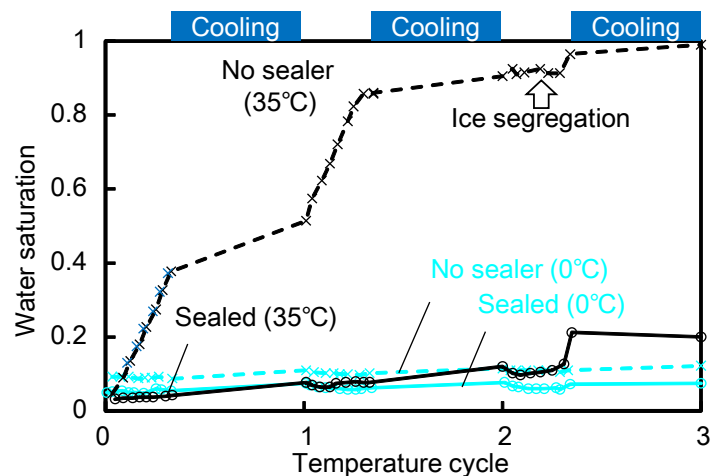


図1 温度昇降サイクル下の素焼きの石の水分飽和度

*1 三重大学大学院生物資源学研究所

*2 三重大学生物資源学部