

凍結にともなう不飽和土中の水分移動と透水係数に与える溶質の影響

Solute effect on water flow and hydraulic conductivity in frozen sand

○和気朋己 渡辺晋生

○Tomomi Wake Kunio Watanabe

はじめに 寒冷地における春先の土壌の水分分布や冬期の地表からの水蒸気フラックスを考える際、あるいは土壌改良や汚染物質の漏洩防止などに土の凍結を利用する際、凍結にともなう土中の物質移動や土の性質の変化を理解することが重要である。そこで本研究では、凍結過程にある不飽和土中の水分・溶質分布を明らかにし、溶質が凍土の透水係数に与える影響を評価した。

試料と方法 体積含水率 $\theta = 0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (実験 : NaCl 濃度 0.10 mol L^{-1} , 実験 : 純水) の鳥取砂

丘砂を、内径 7.8 cm、高さ 35 cm のアクリルカラムに乾燥密度 1.45 g cm^{-3} で充填した。熱電対と TDR センサーを 5 cm 毎に設置し、カラム側面を断熱材にて断熱した。TDR は不凍水量と溶質濃度を測定できるように校正した。試料を 1 日間一定温度に静置し、初期温度分布と初期水分分布を与えた。その後、カラムの上下端の温度を制御し、試料を上端より凍結した。初期温度は 3°C 、上下端の温度は -8°C , 2°C である。カラムへの給排水は無しとした。試料の凍結中、試料内の温度分布、液状水分分布、溶質濃度分布をモニターした。任意の時間に試料を 5 cm 毎に切り、炉乾により各層の全水量を求めた。

結果と考察 温度分布と液状水分分布をモニターすることで、本装置により再現よく凍結実験が行えることが確認できた。ここで、本実験から TDR センサーより不凍水量、熱電対より温度を計測し、その結果から導出した温度-不凍水量関係を示す (Fig.1)。試料が溶質を含むと、温度が低下しても約 -0.4°C まで土中水が凍結しなかった。また、同じ温度に対して、溶質を含むと不凍水量は多くなった。Fig.2 に、試料内の温度分布の経時変化を示す。図中の時間は、カラム両端の制御板に温度差を与えてからの経過時間である。試料が溶質を含むと試料の温度低下が早くなった。溶質の有無による温度分布の違いは、 0°C 面近傍で顕著であった。これは、溶質の添加により氷の生成量が小さくなり、潜熱の発生が少なくなっ

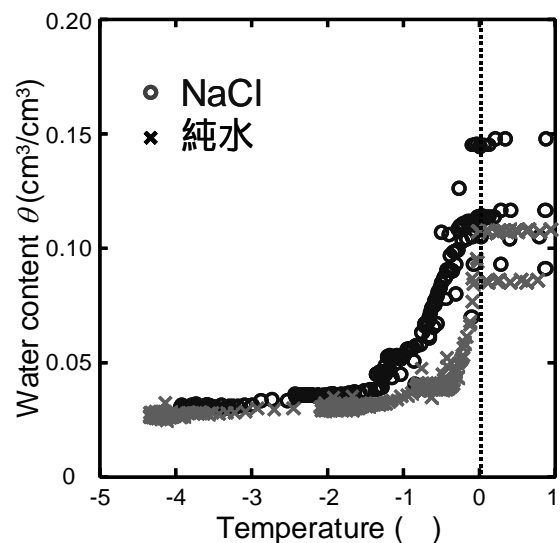


Fig.1 温度-不凍水量関係
Soil freezing curve

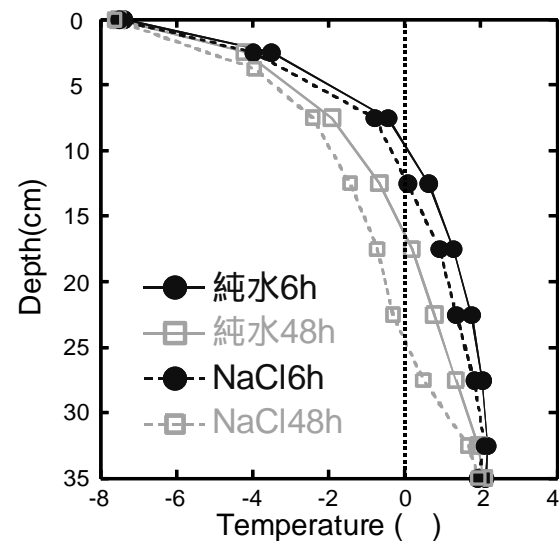


Fig.2 温度分布
Temperature profile in freezing soil

たためと考えられる。Fig.3 に、試料内の全水量分布の経時変化を示す。試料が溶質を含むと凍結にともなう凍土層での水分増加が少なくなった。Fig.4 に、TDR で測定した EC_a から求めた溶質濃度分布を示す。図中の矢印はそれぞれの時間における凍結面の位置を表している。溶質濃度の分布は、全水量分布と類似した。また、濃度は凍結面で最大となった。これは、土中水の凍結にともない、溶質が不凍水中に吐き出されたためと考えられる。また、未凍土層の溶質濃度が低下したのは、液状水とともに溶質が凍土層へ移動したためである。

ここで、試料中の水に相平衡の状態方程式である一般化クラジウスクラペイロンの式が成り立つとし、Fig.2 と式(1)から不凍水の圧力 h を求めた。

$$h = \frac{L_f}{g} \ln \left(\frac{T_m - T}{T_m} \right) \quad (1)$$

このとき、 g は重力加速度、 T_m は氷の融点(273K)であり、氷の融解潜熱は $L_f = 334 \text{ kJ kg}^{-1}$ で一定とした。また、溶質を含む土の不凍水の圧力は、式(1)に溶質濃度から算出した凝固点降下度を考慮して算出した。次に Fig.3 より各時間の水分フラックス、Fig.2 から温度勾配、一般化クラジウスクラペイロン式から算出した不凍水の h から圧力勾配を算出し、非等温化のダルシー則を用いて、凍土の不飽和透水係数 $K(\theta)$ を求めた(Fig.5)。 θ が 0.08 から 0.02 までの減少に対し、 $K(\theta)$ は $10^{-4} \text{ cm h}^{-1}$ から $10^{-8} \text{ cm h}^{-1}$ まで急激に減少する結果となった。また、凍土の $\theta - K(\theta)$ 関係は、溶質の有無にかかわらず同じ傾向を示した。このことから、凍土の $K(\theta)$ は溶質濃度に依存せずに、不凍水量で決まることが明らかになった。また、Fig.1 に示したように、不凍水量は温度により決まる。そのため溶質の存在により凝固点降下が生じるため、 $\theta - K(\theta)$ 関係に変化は無いが、凍土の $T - K(T)$ 関係が変化することがわかる。

おわりに 本研究により、凍結過程にある不飽和土中の水分・溶質分布、また溶質が凍土の透水係数に与える影響を評価することができた。今後は異なる土性での溶質の影響を評価する。

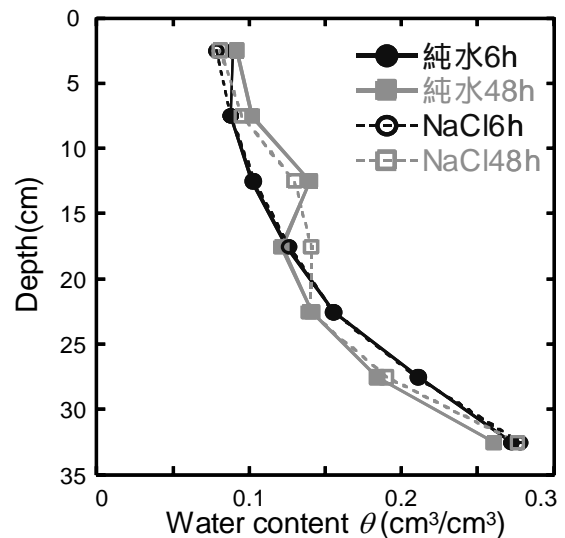


Fig.3 水分分布

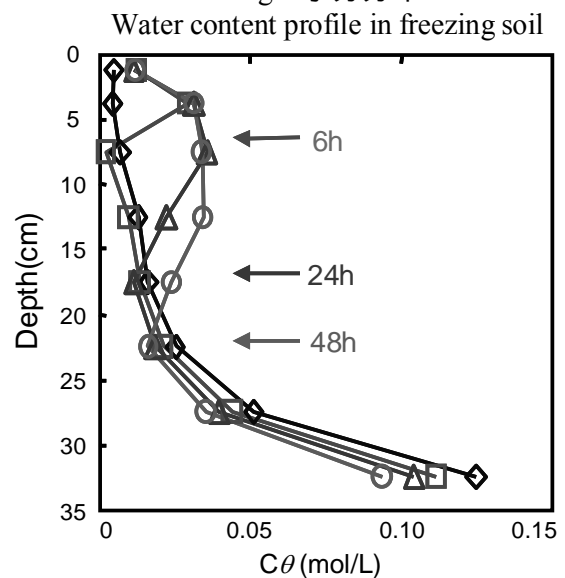


Fig.4 溶質濃度分布

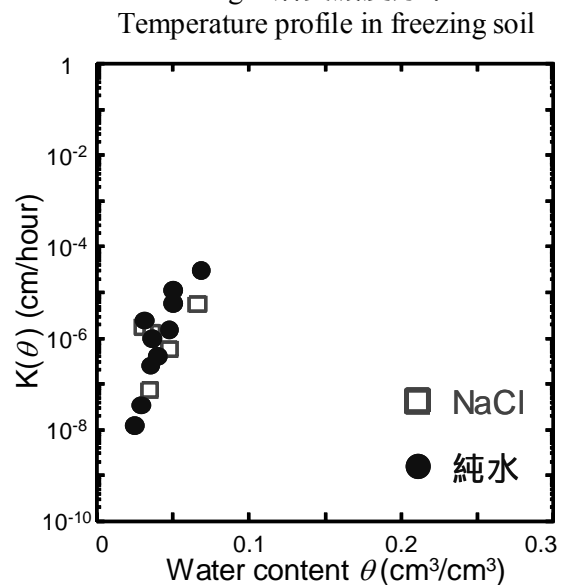


Fig.5 $\theta - K(\theta)$ 関係
 $K(\theta)$ in freezing soil