

水の流れがある土中の凍結過程の観察

Observation of ground freezing with and without ground water flow

渡辺晋生

三重大学大学院生物資源学研究所

要旨

砂試料両側端の水位を等しくした水の流れのない条件と、一定の水位差を設けた水の流れのある条件で、試料に鉛直に挿入した冷却管に -20°C の冷媒を循環した。この際、凍土の発達と地下水位の変化を壁面より観察した。流れのない条件では冷媒循環後 90 分で凍土が不透水性の壁状の層をなしたが、流れのある条件では凍土の成長により流れが遮られるまで 330 分を要した。熱の移流や流れによる間隙氷の形や分布の変化が、凍土の成長と透水性の低下を遅くしたと考えられる。

テーマ：土壌物理研究の最前線 Trend in Soil Physics

キーワード：凍土, 透水性, 地下水位, その場観察

Key words: Frozen ground, Permeability, Ground water level, in-situ observation

1. はじめに

土が凍結すると、その強度が増加し透水性が低下する。このため、凍土を地盤の補強や遮水に利用することがある。人工的に土を凍結する場合、凍土の造成に地下水の流速が及ぼす影響や地中における凍土の造成が地下の水文環境に及ぼす影響を評価することが重要である。

1 次元の土の凍結・融解浸潤過程の水分・熱移動については、これまでも実験や数値解析により理解が進んでいる^{1, 2)}。一方、2 次元的な水の流れをとまなう土の凍結現象の理解やモデル化は遅れている。そこで本研究では、数値モデルの解析に資する基礎的知見を得るため、地下水流れのある土中の凍結実験を行った。

2. 試料と方法

三重県津市の町屋海岸から砂を採取し、水洗後、2 mm 篩通過分を試料とした。試料の飽和透水係数は 30 mm min^{-1} だった。幅 590 mm、奥行 135 mm のガラス容器の左右 60 mm を、それぞれ給水槽および排水槽として通水壁で分画した (図-1)。炉乾燥した試料を、通水壁間 (470 mm) に 300 mm 高まで、乾燥密度が 1.5 Mg m^{-3} になるように均一に詰めた。給水槽から、180 mm に U 字型のステンレス管を槽底

まで鉛直に設置した。また給水槽から 360 mm (冷却管から 180 mm) に水位計を配置した (図-1)。給水槽の水位をマリオット管により、排水槽の水位を排水孔の開閉により、それぞれ制御した。実験は 2°C の低温室で行い、試料や給水の初期温度を 2°C とした。冷却管に送液する冷媒にはエチレングリコール水溶液を用い、冷媒の温度は外部循環式の恒温槽で制御した。ここで二つの条件で試料を凍結した。

<水の流れのない条件> 給水槽に水道水を注ぎ、水位を試料表面に保った。排水槽の排水孔は閉鎖した。給水槽から排水槽に水が到達し、排水槽の水位が給水槽と等しくなった時点で、冷却管に -20°C の冷媒を循環した。冷媒を 180 min 循環した後、排水孔を開放し、排水槽の水位を槽底まで下げた。さらに 180 min 後、冷媒の循環を止め凍土を室温で融解した。

<水の流れのある条件> 給水槽の水位を 190 mm に保ち、排水槽の排水孔を開放した。排水槽の水位が 90 mm で一定となり、乾湿境界の形状が安定した時点 (給水後 50 min) で、冷却管に -20°C の冷媒を循環した。

実験過程を試料側面からビデオ撮影し、乾湿境界と給水槽、排水槽、水位計、マリオット管

の水位を観察した。この際、試料の断熱は行わなかった。実験中、冷却管から成長した凍土の厚さを指先により硬度の違いで判別した。また、マリOTT管と給水槽の水位から土中への水の流入フラックスを算出した。

3. 結果と考察

給水槽に水を注ぐと、6 min 程度で浸潤前線が試料中を排水槽端まで到達し、9 min 後から排水槽へ水が流出した。流れのない条件では、冷媒を循環すると、冷却管の周囲から試料が凍り始め、最初同心円状に、その後それぞれがつながり、壁状に凍土が発達した。この際、若干の凍土の隆起と給水槽側の水位の増加がみられた。凍土の厚さは60 min で24 mm、120 min で38 mm と時間の累乗関数的に増加した。180 min 後には凍土の厚さは50 mm 近くに達した。ここで、排水槽の水位を槽底まで下げたが、給水槽から土中への水の流入はなかった。また、冷媒の循環を止めても、720 min は排水孔からの水の流出を確認できなかった。

図-2 に流れのある条件で観察した給水槽と排水槽、水位計の水位の経時変化を示す。給水開始後50 min で、排水槽の水位が90 mm まで上昇し、その後、水位は概ね一定になった。給水槽からの流入フラックスは約6 mm min⁻¹ だった。ここで、冷却管に冷媒を循環すると冷却管周囲に凍土が発達した。凍土の厚さは冷媒循環後60 min で17 mm、120 min で27 mm

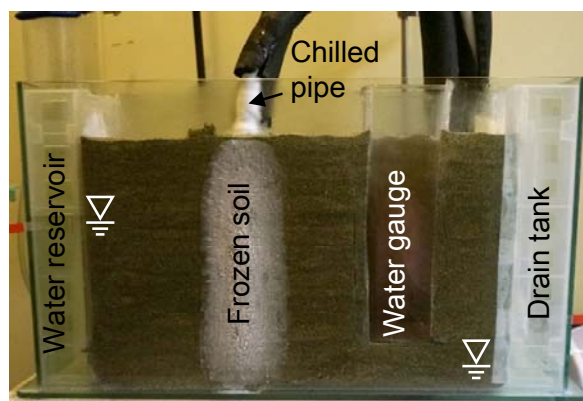


図-1 装置の概要（凍結開始後280分の例）

と流れがない場合の7割程度であった。また、特に凍結初期には、試料上部の不飽和領域の凍土の成長が、下層の湿潤領域より遅れた。冷媒循環後、流入フラックスは徐々に減少し、150 min（凍結開始後100 min）で3 mm min⁻¹、330 min（凍結開始後280 min）で概ね0 mm min⁻¹ となった。流入フラックスの減少とともに、水位計や排水槽の水位も低下し、水の流入がなくなった330 min で、排水槽の水位も概ね槽底に達した（図-2）。流水がある場合は、熱の移流にともなう凍土の成長や透水性低下の遅延や、間隙氷の形や分布の変化にともなう凍結後期までの凍土中の水みちの残存が考えられる。

4. おわりに

水の流れのある条件とない条件について、砂中の凍土層の発達の違いや地下水位の変化を視覚的に示した。今後は、断熱や境界条件を考慮し、実験により凍結にともなう地温や水分量の変化を定量化する。そして、2次元の凍結モデルの数値解析を進める予定である。

参考文献

- 1) Watanabe, K., T. Kito, S. Dun, J.Q. Wu, R.C. Greer and M. Flury, 2013, Water infiltration into a frozen soil with simultaneous melting of the frozen layer, *Vadose Zone Journal*, 12, doi:10.2136/vzj2011.0188.
- 2) Kurylyk B. and K. Watanabe, 2013, The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils, *Advances in Water Resources*, doi:10.1016/j.advwatres.2013.07.016

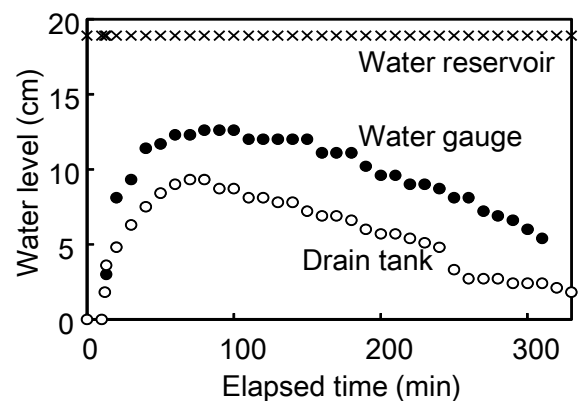


図-2 給水槽、排水槽、水位計の水位