

水質および温度変化過程が異なる砂質土壌の不凍水曲線の比較

近畿大学 正会員 ○高野 保英

University of Calgary Masaki Hayashi

1. はじめに

冬季に土壌が凍結した場合、氷として土壌に保持された大量の液状水が春季に融解するが、この融解水の移動は流域における浸透・流出過程を支配し、河川流量の予測等に大きな影響を与える。それらの算出・予測のためには、凍結・融解過程を受ける飽和－不飽和土壌中の熱・水分移動解析モデルの構築が必要となる。

このような解析モデルでは、土壌水分の凍結量と氷の融解量の定量化が最も重要である。土壌水分は土壌温度が氷点に達した瞬間にすべて凍結するのではなく、一部は液状水として残り（これを不凍水と呼ぶ）、土壌温度の低下に伴い凍結量が増える（不凍水量が減る）こと¹⁾が知られている。しかしながら、土壌温度と不凍水量の関係（不凍水曲線）の特性については不明な点が多い。特に土壌の状態（水分量、土壌の成分など）あるいは環境条件（温度、その変化速度など）によって、不凍水曲線が異なる可能性があるものの、その知見は十分に得られていない。

筆者らは、温度・水分条件等が異なる条件下での不透水曲線の同定を試みている。本稿では、砂質土壌を用いた水の電気伝導度および温度変化速度が異なる条件における不透水曲線の同定実験について報告する。

2. 砂質土壌凍結実験

4×6×8cm のアクリル製カラムを 2 つ用意し、それぞれ体積含水率を約 0.25 に調整した豊浦珪砂を詰める。それぞれのカラムの蓋には TDR センサーおよびサーミスタ（ともに Campbell Scientific 製）が取り付けられており、センサーを砂に挿入し、水密が保たれるようにカラムに装着する。両カラムは、クーラーボックスに入れたエチレングリコール水溶液（以下、水溶液と称す）に漬けられる。クーラーボックスの内壁には、水溶液を入れた低温水槽に繋がられたビニールパイプが取り付けられる。低温水槽で水溶液を冷却・加熱し、ビニールパイプ内に循環させることで、クーラーボックス内の水溶液を冷却・加熱し、カラム内の砂を凍結・融解させる。10 分毎にカラム内の砂の温度およびみかけの誘電率を測定し、あらかじめ求めた体積含水率と誘電率の関係から体積含水率を求める。

表-1 に、実験条件を示す。表中の初期体積含水率は、実験開始時における 2 つのカラムの体積含水率の平均値を示す。また温度変化の項は、低温水槽で循環させる水溶液の設定温度の変化方法を示しており、例えば Case1-1 では水溶液の温度を、最初の 12 時間で 1℃から-17℃ま

表-1 実験条件

	初期体積含水率	水	温度変化
Case1-1	0.24	蒸留水	0hr～12hr：1℃→-17℃ 12hr～24hr：-17℃→1℃
Case1-2	0.26	水道水	0hr～12hr：1℃→-17℃ 12hr～24hr：-17℃→1℃
Case2-1	0.24	蒸留水	0hr～24hr：1℃→-9℃ 24hr～48hr：-9℃→1℃
Case2-2	0.25	水道水	0hr～24hr：1℃→-9℃ 24hr～48hr：-9℃→1℃

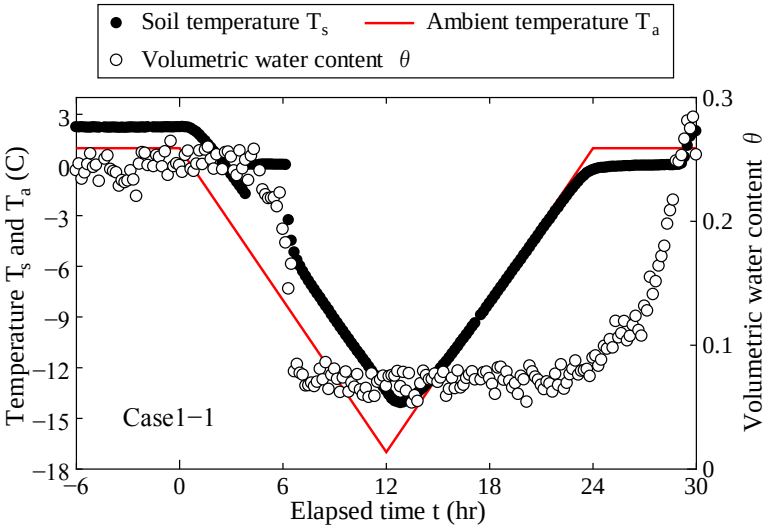


図-1 体積含水率および土壌温度の経時変化（Case1-1）

キーワード 土壌凍結，不凍水曲線，体積含水率，土壌温度

連絡先 〒577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1 T E L 06-6721-2332

で線型に変化させ、続く 12 時間で -17°C から 1°C まで線型に変化させることを意味する。なお使用した水道水および蒸留水の電気伝導度はそれぞれ、 0.15 および 0.00mS/cm であった。

3. 実験結果および考察

図-1 に例として、Case1-1 の体積含水率 θ および土壌温度 T_s の経時変化を示す。図中の赤の実線は循環する水溶液の設定温度を示しており、 $t=0\text{hr}$ が冷却開始時刻となる。

$t=2.5\text{hr}$ 頃より T_s が氷点下を下回るが、 θ は低下せず、過冷却状態であることが知れる。その後 $t=4\text{hr}$ 頃に T_s はほぼ 0°C に上昇し、約 2 時間変化しない。一方 θ は低下を始め、この時点から凍結が始まることがわかる。その後、 T_s の低下とともに θ の低下も続くが、 $t=6\text{hr}$ 頃以降、 θ はほぼ一定となる。 T_s が上昇し、 0°C 付近に達すると、 θ は増加を始め、最終的に実験開始時の θ とほぼ同じ値に戻る。このような θ と T_s の挙動は、温度変化時間の違いなどにより時間 t の値に違いがあるものの、他の実験条件でも同様であった。

図-2 に、Case1-1～Case2-2 の不透水曲線（氷点下時の土壌温度 T_s と θ の関係）を示す。縦軸は、 T_s の絶対値を対数表示で示している。不透水曲線はいずれも、水分特性曲線（ θ とマトリックポテンシャルの関係）とほぼ相似の形状を示しており、いずれの条件でも T_s が約 -4°C 以下では、 θ の値はほぼ同じである。

温度変化条件および初期体積含水率が概ね同じで、使用した水（電気伝導度）が異なる Case1-1 (○) と Case1-2 (赤い○) および Case2-1 (●) と Case2-2 (赤い●) の不透水曲線をそれぞれ比較すると、不凍水曲線は水の電気伝導度の違いにより大きく異なる。図では判別し難いが水道水では、凍結時（図中の Freezing の矢印）および融解時（図中の Thawing の矢印）とも不透水曲線の分布形状はほぼ同じになるが、蒸留水では凍結時と融解時で分布は大きく異なる。また蒸留水の凍結時の不透水曲線は水道水のそれを上回り、逆に融解時の不透水曲線は水道水のそれを下回る分布になる。この原因は、水に含まれる物質による氷点の違いによると推察される。

また、使用した水および初期体積含水率が概ね同じで、温度低下条件が異なる Case1-1 (○) と Case2-1 (●) および Case1-2 (赤い○) と Case2-2 (赤い●) の不透水曲線をそれぞれ比較すると、不透水曲線の分布形状に大きな違いは観られない。このことは、少なくとも今回の実験条件の範囲では、初期体積含水率が同じであれば温度変化速度が異なっても、不凍水曲線の分布形状は大きく変わらないことを示唆する。

以上より砂質土壌においては、(1) 水の電気伝導度が異なる場合、温度変化条件および初期の体積含水率がほぼ同じであっても、不凍水曲線は大きく異なる、(2) 初期体積含水率がほぼ同じであれば、温度変化速度が異なっても、不凍水曲線の分布形状は大きく変わらない、ことが分かった。

4. おわりに

温度・水分条件等が異なる条件下での不透水曲線の同定の試みとして、砂質土壌を用いて水の電気伝導度および温度変化速度が異なる条件における不透水曲線を実験より求めた。その結果、(1) 水の電気伝導度が異なる場合、温度変化条件および初期体積含水率がほぼ同じであっても、不凍水曲線は大きく異なること、(2) 初期体積含水率がほぼ同じであれば、温度変化速度が異なっても、不凍水曲線の分布形状は大きく変わらない、ことを確認した。なお本研究は、JSPS 科研費 26420507 の助成を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺晋生, 取出伸夫, 坂井勝, Jiri Simunek: 凍結をともなう土中の水分・熱・溶質移動モデル, 土壌の物理性, No.106, pp.21-32, 2007.

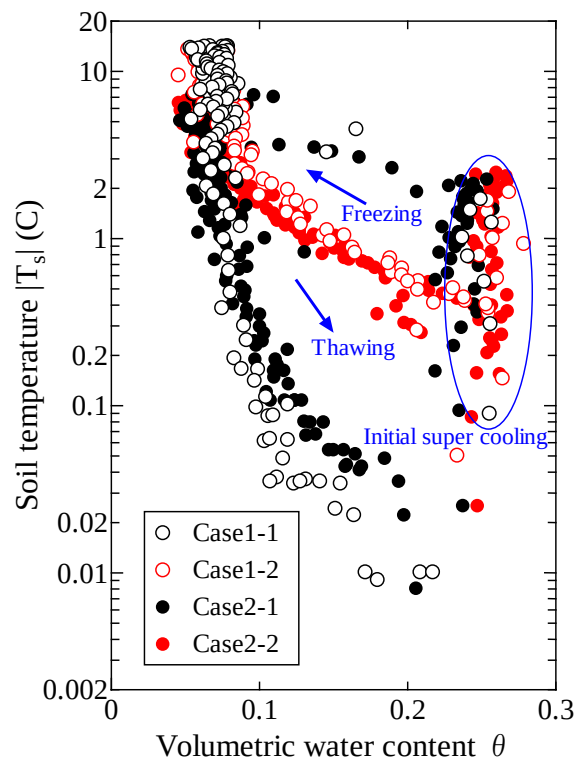


図-2 不透水曲線 (Case1-1～Case2-2)