温度変化速度が異なる真砂土および豊浦珪砂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

凍結土壌に保持された氷が春季に融解する場合，融解水は流域における浸透・流出に影響を与える．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が，その構築にあたっては土壌水分の凍結量と氷の融解量の定量化が最も重要となる．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，液状水が残り（不凍水），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．特に水分量，土壌の成分などの土壌の性質あるいは地温，その変化速度などの環境条件によって，不凍水曲線が異なる可能性がある．

筆者らは，温度・水分条件等が異なる条件下での不凍水曲線の同定を試みており，砂質土壌（豊浦珪砂）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凍水曲線を求めた[2)]．その結果を踏まえて土壌の違いによる不凍水曲線の違いを検討するために，真砂土を用いた不凍水曲線の同定実験，および豊浦珪砂のそれとの比較を試みた．

２．真砂土を用いた凍結実験[2)]

実験では 2mm のふるいをかけた真砂土を使用し，その 50%粒径 (D_{50}) は 0.58mm，土粒子密度は 2.65g/cm^2 である．細野ら[3)]によれば豊浦珪砂の D_{50} は約 0.2mm であり，真砂土のそれより小さいが，真砂土の均等係数は 14.6 であり，豊浦珪砂では約 1.4 である[3)]ため，真砂土の方がより粒度が良いことが分かる[3)]．

高さ 4×幅 6×奥行き 8cm のアクリル製カラムを 2 つ用意し，蒸留水と真砂土を混ぜ，体積含水率を約 0.25，嵩密度を約 1.72g/cm^3 に調整した真砂土を詰める．それぞれのカラムの蓋には長さ 7.5cm の 3 ロッド TDR センサーおよびサーミスタが取り付けられており，センサーを土壌中央部に水平に挿入し，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げ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 分毎にカラム内の土壌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

表-1　実験条件

	土壌	初期体積含水率	温度変化
Case1	真砂土	0.25	0hr～12hr：1℃→-17℃ 12hr～24hr：-17℃→1℃
	豊浦珪砂	0.24	0hr～12hr：1℃→-17℃ 12hr～24hr：-17℃→1℃
Case2	真砂土	0.24	0hr～24hr：1℃→-9℃ 24hr～48hr：-9℃→1℃
	豊浦珪砂	0.25	0hr～24hr：1℃→-9℃ 24hr～48hr：-9℃→1℃

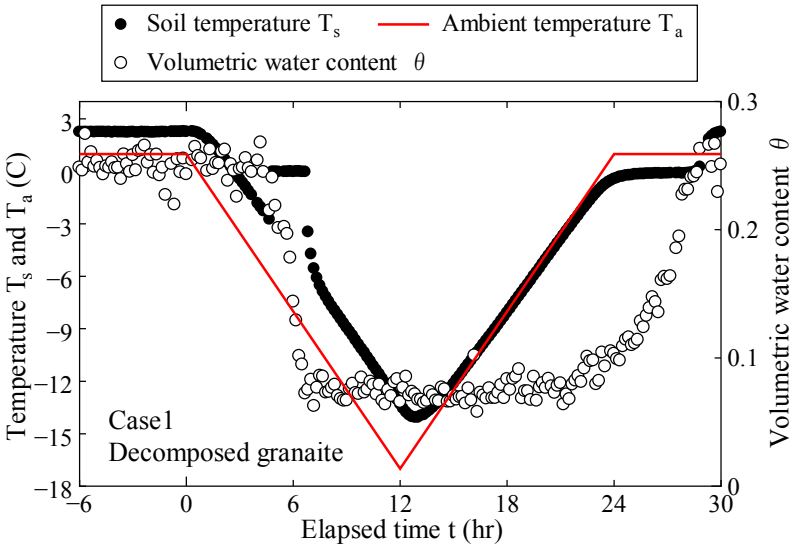

図-1　体積含水率および土壌温度の経時変化（Case1，真砂土）

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　ＴＥＬ06-6721-2332

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いる. なお実験方法については, 参考文献 2)を参照されたい.

３．実験結果および考察

図-1 に例として, Case1 の真砂土の体積含水率 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= 0hr が冷却開始時刻となる.

t=3hr 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=5hr 頃に T_s はほぼ 0℃に上昇し, 約 2.5 時間変化しない. 一方 θ はこの時間から低下を始め, 凍結が始まる. t=7hr 頃以降, θ はほぼ一定となる. T_s が上昇し, t=22hr 頃になると 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により時間 t の値に違いがあるものの, Case2 でも同様であった.

図-2 に, Case1 および Case2 における真砂土と豊浦珪砂の不凍水曲線（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.

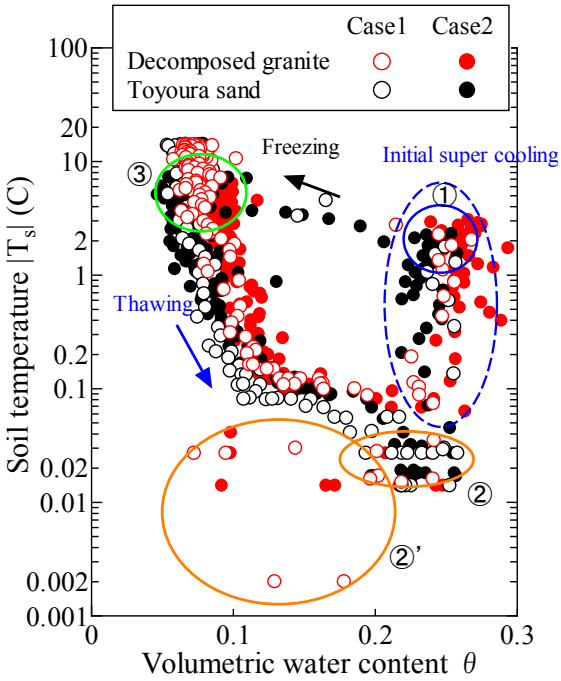

図-2 不凍水曲線（Case1 および Case2）

真砂土の不凍水曲線に注目すると, 温度変化速度の違いに関わらず Case1（赤い○）および Case2（赤い●）はほぼ同じ形状を示しており, 真砂土においても豊浦珪砂と同様, 温度変化速度の異なっていても, 体積含水率が 0.25 程度でほぼ同じであれば, 不凍水曲線はほぼ同じになることが知れる.

また, 真砂土と豊浦珪砂の不凍水曲線を比較すると（Case1 : 赤い○と黒い○, Case2 : 赤い●と黒い●）, 図中, 青い破線の円で囲んだ部分（Initial super cooling）は過冷却状態のデータを示しているが, この部分も含めて, Case1 および Case2 とも真砂土と豊浦珪砂の不凍水曲線はほぼ同じ形状を示すことがわかる. しかしながら, 過冷却終了直後の変化には若干の違いが観られる. すなわち豊浦珪砂では過冷却終了後, 図中①付近（青い円で囲んだ部分）から②付近（橙色の小円の部分）に移動し（この間, 温度はほぼ 0℃）, その後の温度の低下とともに①付近に再び戻り, Freezing の矢印に沿って体積含水率が低下, 最終的に③付近（緑の円で囲んだ部分）に至る. 一方真砂土では, ①付近から②’付近（橙色の大円の部分）に移動し, その後の温度の低下とともに③へ急に移動するような変化を示す（ただし 0℃付近の不凍水曲線の挙動には, サーミスタの精度である±0.2℃以内の誤差が生じている可能性はある）.

以上より, 真砂土と豊浦珪砂では D_{50} および均等係数に違いがあるものの, 温度変化条件が同じで初期体積含水率が 0.25 程度であれば, 両者の不凍水曲線は, 過冷却終了直後を除いて, ほぼ同じ形状を示すことが分かった.

４．おわりに

種々の条件下での不凍水曲線の同定を目的として, 真砂土を用いて温度変化速度が異なる条件における不凍水曲線を実験より求め, 豊浦珪砂のそれとの比較を試みた. その結果, (1) 真砂土においても, 温度変化速度の違いに関わらず, 体積含水率が 0.25 程度であれば, 不凍水曲線はほぼ同じ形状になること, (2) 温度変化条件が同じで初期体積含水率が 0.25 程度であれば, 真砂土と豊浦珪砂の不凍水曲線は, 過冷却終了直後除いて, ほぼ同じ形状を示すこと, を確認した. なお真砂土の試料および土質に関するデータは, 近畿大学理工学部河井克之准教授より提供を受けた. また本研究は, 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.

2) 高野 保英, Masaki Hayashi : 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, 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集, Ⅱ-159, p.317-318, 2016.

3) 細野康代, 吉嶺充俊 : 豊浦砂の粒度分布, 土木学会第 64 回年次学術講演会概要集, Ⅲ-168, p.335-336, 2009.