

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420507

研究課題名(和文) 寒冷地における土壌中の熱・水分移動および凍結量解析モデルの構築

研究課題名(英文) Development of the numerical model of heat and moisture transfer and freezing in soil at a cold district

研究代表者

高野 保英 (TAKANO, Yasuhide)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：80330231

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：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凍水曲線の同定実験，さらに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を試みた。

その結果砂質土壌において不凍水曲線は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，大きく異なること，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，形状は大きく変わらない，ことが分かった。また真砂土と豊浦珪砂では，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。

研究成果の概要(英文)：To determine Soil Freezing Curves (SFC) with some soils under the difference speed of soil temperature change and the water, the soil freezing experiments were carried out using Toyoura sand and decomposed granite.

The results from these experiments are as follows: (1)Soil Freezing Curves of Toyoura sand using tap water and distilled water are very differ despite under the same soil water content and speed of soil temperature change.(2)Soil Freezing Curves of Toyoura sand under same soil water content are similar despite under the difference speed of soil temperature change. (3)Soil Freezing Curves of Toyoura sand and decomposed granite under same soil water content and speed of soil temperature change is similar except for immediately after the super cooling.

研究分野：水文学

キーワード：凍結土壌 不凍水曲線

1. 研究開始当初の背景

土の温度が 0 以下になり土壌中の水分が凍ると、土壌は凍結状態となり、いわゆる凍土となる。凍土は、水分の凍結に伴う体積膨張により土の表面を持ち上げる凍上を引き起こし、道路舗装や地中構造物の破壊、植生の根の切断などの諸問題を生む。また、冬季に氷として土壌に保持された大量の液状水が春季に至って融解するが、これら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。このように土壌の凍結および融解は、様々な分野において重要な問題を提起する。

しかしその現象の予測、とりわけ土壌中の水分の凍結および融解に伴う、土壌温度、水分量、凍結量あるいは浸透量の予測は、水文学の分野を中心に古くから研究が進められたにもかかわらず、十分な成果を挙げているとは言い難い。すなわち、現象が可能な限り合理的に説明・モデル化され、かつ実用に耐えうる程度の精度を有する、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(以後、凍結モデルと呼称)の構築には至っていない。

凍結モデルで土壌温度や水分量を予測する場合には、土壌水分の凍結量あるいは氷の融解量の定量化が最も重要である。土壌内の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、一部の水分は液状水として残り(その量を不凍水量と呼ぶ)、土壌温度の低下に伴い凍結量が増える(不凍水量が減る)ことが知られている。既往の研究では、現地観測や限られた範囲での実験により土壌温度と不凍水量の関係(不凍水曲線)を求め、あるいは不凍水曲線が土壌水分特性曲線(土壌水分量と保水力の関係)と相似であると仮定し、その関係を定式化してモデルに組み込み、凍結量(または融解量)を求める。しかしながら、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、その低下速度など)によって、土壌温度と不凍水量の関係が変わる可能性があるものの、それに関する知見は十分に得られていない。また不凍水曲線と土壌水分特性曲線の相似性は、飽和状態でのみ成立する仮定であり、それに基づいた不凍水曲線の汎用性には限界がある。

2. 研究の目的

本研究においては、種々の土壌および条件下における不凍水曲線を実験的に求め、その特性を検討する。それらの不凍水曲線を基にした合理的な凍結量(融解量)算定式を組み込んだ、凍結・融解過程を受ける不飽和土壌中の熱・水分移動解析モデルの構築を目指す。また不凍水曲線に加えて、凍結土壌の熱・水分移動特性に関するパラメータを定量化し、上記モデルに組み込む。具体的には、以下のような実験・解析を実施する。

(1) 土壌の種類、初期水分量、冷却・凍

結方法を種々変化させた不飽和土壌凍結実験を行い、不凍水曲線を求めることにより、土壌・環境条件の違いによる不凍水曲線の違いを検討し、その特性を把握する。また、凍結土壌の不飽和透水係数や熱伝導率などの土壌熱・水分移動に関するパラメータの同定を試みる。

(2) 上記の実験により得られた不凍水曲線を基にした凍結量(融解量)算定式、および熱・水分移動パラメータを組み込んだ、凍結・融解過程を受ける不飽和土壌中の熱および液状水移動解析モデルの構築する。現場観測結果にモデルを適用し、土壌温度、液状水水分量、土壌中の水量、浸透水量などの観測結果と解析結果を比較・検討することにより、その妥当性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 水質が異なる条件下における不透水曲線の同定

温度および水質が異なる条件下での不透

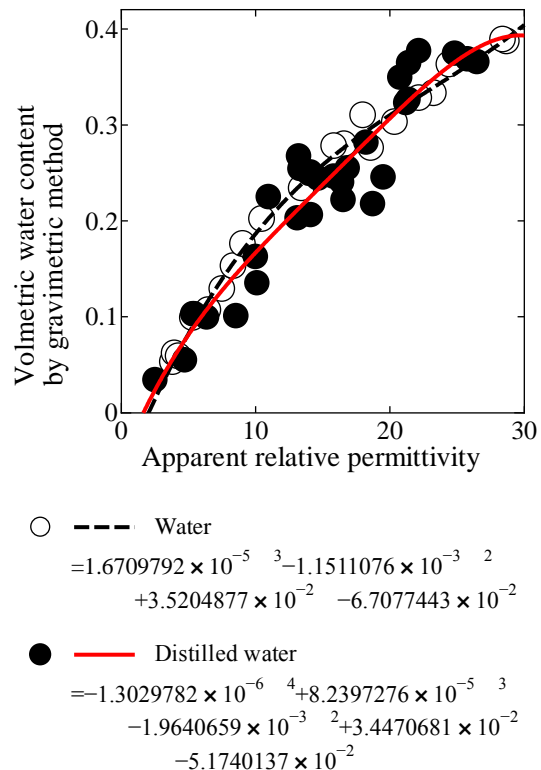


図1 キャリブレーション結果(水道水および蒸留水)

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<br>12hr ~ 24hr : -17 1 |
| Case1-2 | 0.26    | 水道水 | 0hr ~ 12hr : 1 -17<br>12hr ~ 24hr : -17 1 |
| Case2-1 | 0.24    | 蒸留水 | 0hr ~ 24hr : 1 -9<br>24hr ~ 48hr : -9 1   |
| Case2-2 | 0.25    | 水道水 | 0hr ~ 24hr : 1 -9<br>24hr ~ 48hr : -9 1   |

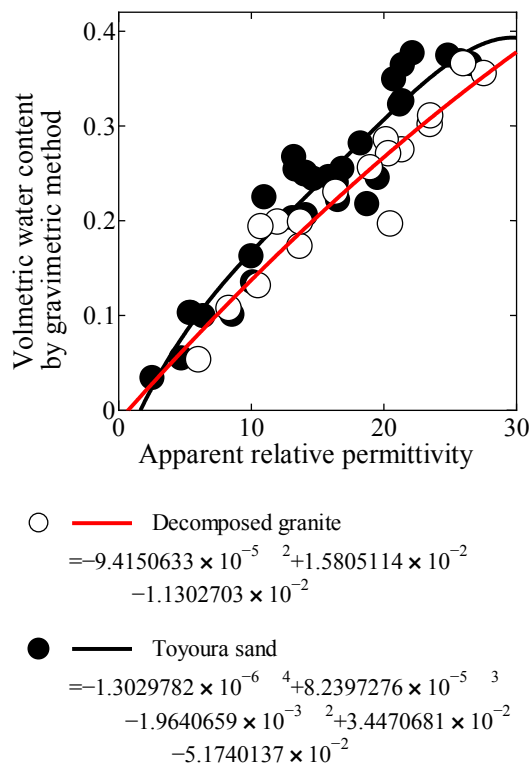


図2 キャリブレーション結果(真砂土および豊浦珪砂)

表2 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<br>12hr ~ 24hr : -17 1 |
|       | 豊浦珪砂 | 0.24    | 0hr ~ 12hr : 1 -17<br>12hr ~ 24hr : -17 1 |
| Case2 | 真砂土  | 0.24    | 0hr ~ 24hr : 1 -9<br>24hr ~ 48hr : -9 1   |
|       | 豊浦珪砂 | 0.25    | 0hr ~ 24hr : 1 -9<br>24hr ~ 48hr : -9 1   |

水曲線の同定の試みとして、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を実施し、その比較を試みた。

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(蒸留水と水道水、図1)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まで線型に変化させ、続く12時間で-17から1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。

(2)土壌が異なる条件下における不透水曲線の同定

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結果を踏まえて、土壌の違いによる不透水曲線の違いを検討するために、真砂土を用いた不透水曲線の同定実験、および豊浦珪砂のそれとの比較を試みた。

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<sub>50</sub>)は0.58mm、土粒子密度は2.65g/cm<sup>3</sup>である。細野らによれば豊浦珪砂のD50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であるため、真砂土の方がより粒度が良いことになる。

高さ4×幅6×奥行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<sup>3</sup>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(真砂土と豊浦珪砂、図2)から体積含水率を求める。表2に、実験条件を示す。

#### 4. 研究成果

(1)水質が異なる条件下における不透水曲線の同定

図3に例として、Case1-1の体積含水率および土壌温度T<sub>s</sub>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=2.5hr頃よりT<sub>s</sub>が氷点下を下回るが、は低下せず、過冷却状態であることが知れる。その後t=4hr頃にT<sub>s</sub>はほぼ0に上昇し、約2時間変化しない。一方は低下を始め、この時点から凍結が始まることになる。その後、T<sub>s</sub>の低下とともにの低下も続くが、

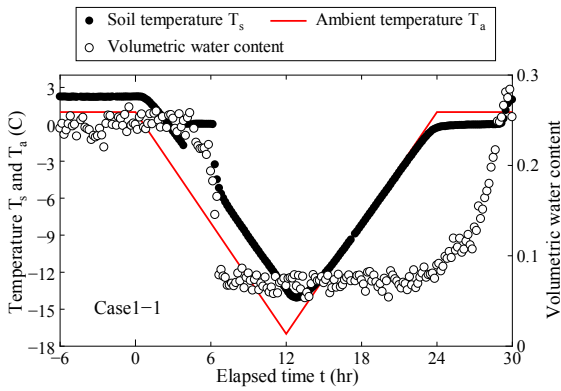


図3 体積含水率および土壌温度の経時変化 (Case1-1, 蒸留水)

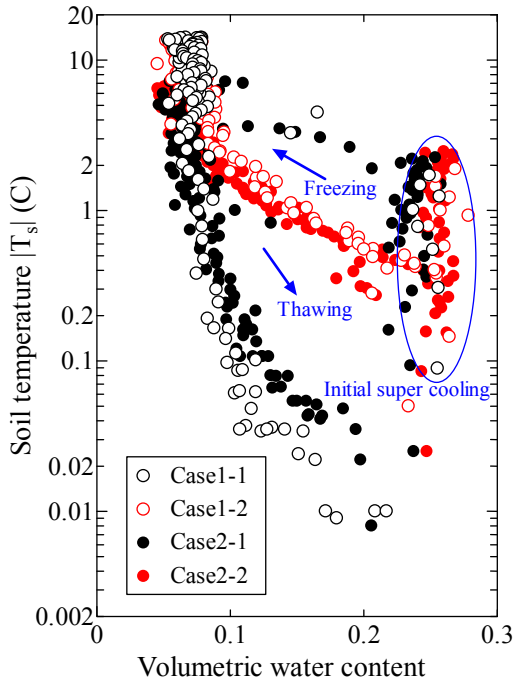


図4 不透水曲線 (Case1-1 ~ Case2-2)

$t=6\text{hr}$  頃以降,  $\theta$  はほぼ一定となる.  $T_s$  が上昇し,  $0$  付近に達すると,  $\theta$  は増加を始め, 最終的に実験開始時の  $\theta$  とほぼ同じ値に戻る. なおこのような  $\theta$  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4に, Case1-1~Case2-2の不透水曲線を示す. 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 ( $\theta$  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  $-4$  以下では,  $\theta$  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, 不透水曲線は水の電気伝導度の違いにより大きく異なる. 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

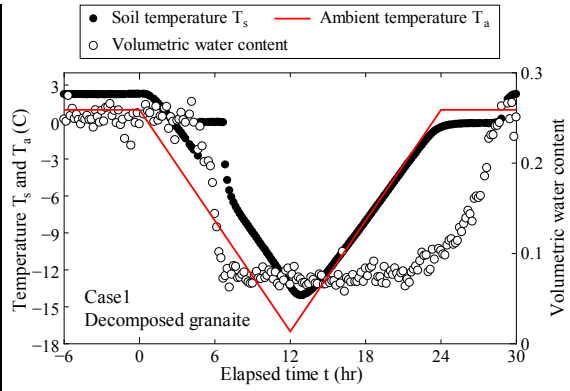


図5 体積含水率および土壌温度の経時変化 (Case1, 真砂土)

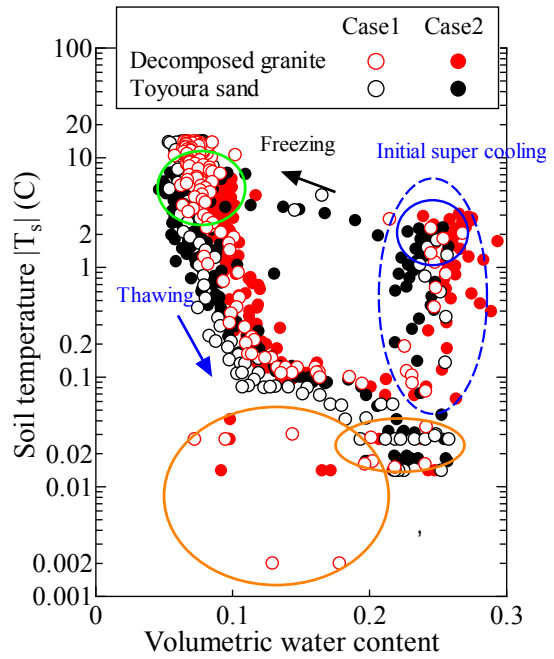


図5 不透水曲線 (Case1-1 ~ Case2-2)

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, 不透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, 不透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, 不透水曲線の分布形状は大きく変わらない, ことが分かった.



(2) 土壌が異なる条件下における不透水曲線の同定

図 5 に例として、Case1 の真砂土の体積含水率 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。 $t=3\text{hr}$  頃より  $T_s$  が氷点下を下回るが、は低下せず、過冷却状態であることが知れる。その後  $t=5\text{hr}$  頃に  $T_s$  はほぼ 0 に上昇し、約 2.5 時間変化しない。一方はこの時間から低下を始め、凍結が始まる。 $t=7\text{hr}$  頃以降、はほぼ一定となる。 $T_s$  が上昇し、 $t=22\text{hr}$  頃になると は増加を始め、最終的に実験開始時の とほぼ同じ値に戻る。なおこのような  $T_s$  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 6 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 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。

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。

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 付近（青い円で囲んだ部分）から 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 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 付近（緑の円で囲んだ部分）に至る。一方真砂土では、 付近から 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 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  $\pm 0.2$  以内の誤差が生じている可能性がある）。

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。

#### < 引用文献 >

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,

-168, p.335-336, 2009.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

高野保英, Masaki Hayashi, 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, 土木学会全国大会第 72 回年次学術講演会, 平成 29 年 9 月, 九州大学伊都キャンパス(福岡県福岡市)  
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, 土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会, 平成 28 年 9 月 9 日, 東北大学川内北キャンパス(宮城県仙台市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高野 保英 (TAKAN0, Yasuhide)  
近畿大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 8 0 3 3 0 2 3 1

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者

Masaki Hayashi (HAYASHI, Masaki)