

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H03888

研究課題名(和文) 環境変化に伴う土壌凍結層の盛衰と凍結層下の物質循環機構の解明と予測

研究課題名(英文) Fate of frozen soil layer under environmental changes, and the dynamics of water and solute in soil under the frozen soil

研究代表者

渡辺 晋生 (Watanabe, Kunio)

三重大学・生物資源学研究所・教授

研究者番号：10335151

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：様々な水分・温度環境下における土の凍結融解過程について、未凍土から凍土への溶質移動とそれに伴う凝固点や凍結速度の変化と不凍水中への溶質の濃縮、浸潤水の流下に伴う5つの温度領域の変遷、凍土層下の未凍土中の有機物分解や硝化過程に水分移動が及ぼす影響、凍上やアイスレンズの析出に水分供給の異方性や土中の異物が及ぼす影響などを明らかにした。また凍結モデルについて、非平衡な土中水の凍結融解や表面境界条件の与え方など提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

凍結融解によって生じる土中の水分移動は、栄養塩・化学汚染物質の移動や、凍土層下の微生物活性を律則し、農地の水分・施肥管理や地耐力に影響を及ぼすだけでなく、硝酸態窒素の地下水帯への流出や温室効果ガスの地表への放出を誘起する。温暖化に伴う土壌凍結深分布や降水パターンの変化が顕在化しつつある現在、農業の持続的展開、気候変動への適応、生態環境との調和、省エネルギーの観点から、環境変化に伴う土壌凍結層の盛衰と付随する物質移動の理解が求められている。本研究で明らかになった知見や蓄積された実験データ、改良されたモデルはこうした理解を大いに進めるものである。

研究成果の概要(英文)：To understand soil freezing and thawing under various moisture and temperature environments, laboratory experiments and numerical analysis were performed. Solute transport from unfrozen to frozen soil was verified, and change in the soil freezing point and freezing rate depending on the solute transport were clarified as well as condensation of solute into unfrozen water in the frozen soil. When water infiltrate into dry frozen soil, five temperature regions were appeared. And, organic decomposition and nitrification in soil under the frozen soil was investigated. It was suggested that soil water flow enhance the mineralization and nitrification in the soil. For frost heaving, effects of anisotropy of groundwater supply route to freezing front, and solute and foreign substances in the soil were elucidated. We also proposed ideas to improve soil freezing model, such as non-equilibrium freezing and thawing of soil water and feasible surface boundary conditions.

研究分野：土壌物理学

キーワード：凍土 気候変動 溶質移動 浸潤 地表面過程 有機物分解 硝化 凍上

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地表が 0 以下に冷やされると、土中水が凍結面近傍に引き寄せられ凍結する。地表に形成された凍土の透水性は低く、春先に融雪水の一部は湛水、あるいは地表を流出する。また、凍土の消失期には、年最大規模の下方浸透が観測されることも珍しくない。こうした地盤の凍結・融解時の土中水の再分布は、栄養塩・化学汚染物質の移動や、凍土層下の微生物活性を律則し、農地の水分・施肥管理や地耐力に影響を及ぼすだけでなく、硝酸態窒素の地下水帯への流出や温室効果ガスの地表への放出を誘起する。温暖化に伴う土壌凍結深分布や降水パターンの変化が顕在化しつつある現在、農業の持続的展開、気候変動への適応、生態環境との調和、省エネルギーの観点から、環境変化に伴う土壌凍結層の盛衰と付随する物質移動の理解が求められている。さらに、凍土は軟弱地盤の改良や遮水に利用されることがある。近年では、都市部地下の施行において、これまでに無く複雑な形状の凍土の造成や、水分不飽和や地下水流れの影響が生じる環境下での適切な凍土の造成に注目が集まっている。こうした計画の評価や新たな凍土造成技術の開発に向けても、土の凍結融解と物質移動の理解は不可欠である。

様々な環境下における土壌凍結とその際の物質移動については、各国において数値モデル開発が進められている。研究代表者らも、不凍水量や土中氷の測定、カラム凍結実験に基づき、土の凍結モデルの改良に取り組んできた。こうした取り組みにより、比較的単純な条件下での土の凍結とその際の物質移動の予測が可能となった。しかし、実際の土の凍結環境には様々な不均一性があり、こうした不均一性は凍土層下の物質の態の変化や移動にも影響を及ぼす。また、人工凍土の遮水壁のように、水の流れは凍結層の盛衰に多大な影響を及ぼす。こうしたより複雑かつ現実的問題への展開が、土の凍結研究に求められている。

また、土の凍結に比べ融解に関する研究は遅れている。これは、融解過程では遷移的状況下で水量や透水係数が激しく変化するため、現行の温度平衡や単純な境界条件を仮定した凍結モデルでは融解速度や浸潤量を表現できないためである。そこで研究代表者らも、これまでに間隙構造を考慮した凍土の不飽和透水モデルを構築し、凍土への融解浸透過程や凍結融解時の不凍水量のヒステリシスを実験的に明らかにしてきたが、境界条件や溶質移動など検討課題が残されている。また、凍結過程に比べ凍土の融解や融解浸潤過程は地中のマクロポア（粗間隙）の影響を強く受ける。しかし、こうした凍土の融解と物質移動に対する土の非一次元性の影響については未だ殆どわかっておらず、農地の湛水や融解湖の突然の消失、人工凍土からの漏水、融解期の温暖化ガスの放出等を検討するためには、更なる実験データの蓄積とモデルの改良が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究においては、(1)土壌凍結層の盛衰に伴い、土中の水分や硝酸等の溶質がどのような挙動を示すか、またこうした挙動に融雪水の浸潤や粗間隙の割合が及ぼす影響を明らかにすることを目的に、一次元土カラムの凍結・融解実験を行う。この際、氷の成長の非平衡により不凍水量や凍結分布が、実測と現行の凍結モデルでどの程度異なるのかを評価し、モデルの問題点を整理することも目的とする。また、こうした土の凍結融解をより現実的に再現できる数値モデルの地表面境界条件を検討する事を目的に、様々な境界条件の比較と水分・溶質動態の解析を行う。

(2)土の凍結過程や凍土中の析出氷（アイスレンズ）の生成に水分供給方向の異方性や、遮水剤や構造物など土中の異物の存在が与える影響を明らかにすることを目的に、ヘレシオセルや水槽型の容器を用いて、地中に設置した凍結管からの凍土の発達過程とその際の凍上現象についてその場観察を行う。そして凍上量の定式化と現行の凍上伝播モデルへの応用を検討する。

(3)地表の凍結・融解にともなう凍結層下の環境変化や物質動態を明らかにすることを目的に、不飽和土については有機物分解と硝化の反応速度定数に土中の温度や、水分流れ、基質が及ぼす影響を明らかにする。この際、有機物分解過程や硝化過程と土中の微生物活性（ATP）の関係も検討する。そして、水分溶質移動モデル HYDRUS に化学反応データベース PHREEQC を連結した HP1 モデルでこれらの現象を再現し、凍結モデルへの結合を目指す。

### 3. 研究の方法

試料には、岩手大学附属農場の休耕畑の表層から採土した黒ボク土、三重大附属農場で採土した黄色土、三重大学内農場で採土した低地土、鳥取砂丘砂、および藤の森シルトを用いた。各試料は、2 mm 篩通過分とし、砂については、先に水洗した。

(1) 任意の含水率と硝酸カリウム濃度、乾燥密度に調整した試料を、内径 7.8 cm、高さ 35 cm のアクリル鉛直カラムに均一に充填した。そして、カラム上下端に温度制御装置（冷却装置）を取り付けた。境界条件を検討する実験では、カラム上端の土と冷却装置の距離を 0 cm の接触型と 1~7 cm の空気層を持つ大気冷却型を準備した。カラム側面から T 型熱電対を 1 cm 間隔で 34 本、テンシオメータと TDR プローブを 5 cm 間隔あるいは静電容量型プローブを 2.5 cm 間隔で設置した後、カラム側面を断熱した。カラムを 2 の恒温室に 2 日間静置することで、試料に初期条件として一定の温度分布と重力平衡の水分分布を与えた。ここで、カラム上下端の冷却装置に任意の温度の冷媒を循環し、試料を上端より凍結した。その後、任意の時間に試料上端の温度

を変え、凍結層を融解、再凍結した。浸潤実験においては融解開始とともに試料上端から一定流量で0の水を供給するとともに下端を大気に解放した。それ以外の実験では、カラム上下端からの水分の流入出はなしとした。試料の各深さの温度、水分量(0以下では不凍水量)、圧力水頭(水ポテンシャル)を2.5分間隔で測定した。実験は多連で行い、任意の時間に1つずつカラムを2.5 cm分画に切断し、試料の全水量分布を測定した。そして、各時間の各分画の全水分量の差違から、各深さの水分フラックスを求めた。現行の凍結モデルを用いカラム実験の数値解析を行った。計算にはHYDRUSを用いた。

(2) 凍土中のアイスレンズや凍上現象の観察については、試料と純水を混合後脱気し、640 kPaの加重で3日間脱水圧密することで、直径100 mm、厚さ20 mm、乾燥密度1.46 Mg/m<sup>3</sup>の飽和円盤試料を作成した。遮水剤の効果を検討する実験では、試料にゲル状ケイ酸塩を任意の混合率で同時に添加した。円盤試料を厚さ10 mmのアクリル板で挟み(ヘレシオセル)中央に外径8 mmの銅管(凍結管)を通した。凍結管から四方にそれぞれ5 mm間隔で熱電対を挿入した。ここで、セルを水槽に入れ、任意の水位を与えた。そして、試料を2に馴化した後、凍結管に冷媒を循環し、試料を中央より凍結するとともに、凍結面近傍の様子をタイムラプスカメラで観察した。

また、300×300×200 mm<sup>3</sup>のアクリル容器の中央20 mm高に、内径10 mmのアルミニウム管(凍結管)を通し、試料を乾燥密度1.29 Mg/m<sup>3</sup>、含水率0.53(飽和)の均質な土層になるように、120 mm高まで充填した。この際、地中構造物を模して、試料土層中にアクリル壁(ii)(iii)やPETシート壁(iv)を設置した。試料には45、70、95 mm高に30 mm間隔で21本の熱電対を挿入した。試料を2に馴化した後、凍結管に冷媒を循環し、試料を凍結するとともに、凍結面近傍の様子と凍上変位をタイムラプスカメラで観察した。

(3) 不飽和土については、高さ20 cm、内径5 cmのカラムに試料を詰め、有機物分解過程を検討する実験では上層10 cmに油粕を400 mg/100g<sub>soil</sub>になるように添加し、硝化過程を検討する実験では全層に(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液5 cmol-N/Lを加えた後、降水装置を用いて地表より一定流量で純水を滴下した。カラムの4深度に4極センサーとテンシオメータを設置し、電気伝導度ECと圧力水頭を10分間隔で測定した。下端から35.5 cm下方に排水口を設け、排液を30 mL毎に採取した。排液については各種イオン濃度とpH、ECを測定した。実験は多連で行い、任意の時間にカラムを一つずつ解体し、各深さの含水率とpH、窒素各態の量を測定した。実験は25の室内で行った。また、比較のためバッチ試験を並行して行った。実験結果を水分移動のリチャーズ式と溶質移動の移流分散方程式を用いて解析した。この際、陽イオンの吸脱着にはイオン交換モデルを、有機物分解とNH<sub>4</sub>の硝化には一次分解反応を仮定した。計算にはHP1を用いた。

#### 4. 研究成果

(1) NO<sub>3</sub>-Nを含む土を上端から凍結すると、未凍土層から凍土層へ水分が移動した。凍結面の温度は初期に加えた溶質のモル濃度から計算される凝固点と概ね一致した。同じ深さであっても初期NO<sub>3</sub>-N濃度が高いほど凝固点に達するまでの時間が遅く、温度降下速度が緩やかになった。また初期濃度が高いほど凍土中の不凍水量が増加し、未凍土から凍土への水分移動量も増加した。Fig. 1に初期NO<sub>3</sub>-N濃度が30 cmol/Lの黒ぼく土を48時間凍結した際の、土単位体積当たりのNO<sub>3</sub>-N量 $\theta c$ と土中水中のNO<sub>3</sub>-N濃度 $c$ の分布を示す。 $\theta c$ は凍土層で高く、未凍土層で低くなった。水分移動に伴い未凍土中のNO<sub>3</sub>-Nが凍土中に移動したと言える。また、初期濃度が高いほど凍土と未凍土の $\theta c$ の差が大きくなった。未凍土では $\theta c$ は減少したがNO<sub>3</sub>-N濃度 $c$ は初期濃度から変化しなかった。凍土形成時には土中氷がNO<sub>3</sub>-Nを全て、あるいは一部を吐き出して形成する場合と吐き出さずに形成する場合が考えられる。氷がNO<sub>3</sub>-Nを全て吐き出したときの不凍水中の濃度は $c_{ex}$ まで濃縮され、吐き出さない場合は氷と不凍水中の濃度は $c_{in}$ で等しくなる。ここで、 $c_{ex}$ を仮定すると48 h凍結後の凍土層の不凍水中のNO<sub>3</sub>-N濃度は最大で106.9 cmol/L (Fig. 1b 塗丸)と約4.2倍に濃縮されたこととなり、 $c_{in}$ を仮定すると不凍水中のNO<sub>3</sub>-N濃度は未凍土中の土中水濃度とほとんど一致した (Fig. 1b 白丸)。実際の不凍水の濃度は $c_{ex}$ と $c_{in}$ の間になると推定される。そこで、測定された不凍水量と水分特性曲線の差異から溶質濃度の経時変化を求めると、凍結開始後数時間は $c_{in}$ に近い状態が続くが、その後不凍水中への濃縮が進み24時間後には概ね不凍水中のNO<sub>3</sub>-N濃度が $c_{ex}$ に達する事が明らかとなった。

土中のNO<sub>3</sub>-Nが凍結により未凍土から凍土にどの程度どのように集積するかを具体的に示し、凍結前の濃度と凍結深や未凍土からの水分・溶質移動量を定量化した例は希少であり、不凍水中への濃縮過程についての知見はこれまでにないものである。今後はこれらの実験結果を再現できるよう土の凍結の数値モデルの改良を進めると共に、炭酸塩など析出を伴う溶質種について、実験の拡張を試みる必要がある。

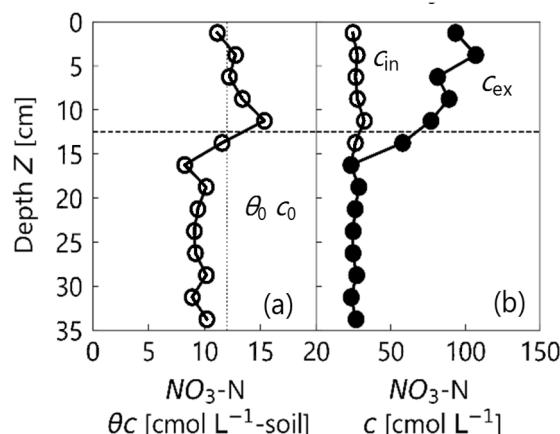


Fig. 1 NO<sub>3</sub>-N concentration (a) in soil  $\theta c$  and (b) in soil water  $c$  when the sample with initial NO<sub>3</sub>-N concentration of 30 cmol/L was frozen for 48 h.

次に土の凍結モデルの境界条件を検討した。地表面の温度を冷却装置で直接制御した場合、実測の 0 cm 深の地温を第一種境界条件で与えることで、計算により土カラム全体の水分、温度分布の時間変化を良く再現ができた。一方、空気層を介して地表を冷却した場合については、実測した 0.5 cm 深の地温を再現するように 2.5 cm 高の気温を用いてみかけの熱交換係数を決定した。Fig. 2 は再現計算例であり、マークが気温  $T_{air}$  と地表面温度  $T_{soil}$  の実測値を、実線が気温から再現した地表面温度をそれぞれ示す。こうして求めたみかけの熱交換係数  $h_{ex}$  は初期含水率  $\theta$  に比例し、 $h_{ex} = 36.4\theta + 8.08$  の関係が得られた。そこで、この熱交換係数と初期含水率の関係を用いて地表の熱フラックスを第三種境界条件で与えると、カラム実験で測定された温度と液状水量分布をよく再現できた。

ここで、様々な初期含水率の試料を大気を介して冷却した時の地表面熱フラックスの経時変化を Fig. 3 に示す。負のフラックスは冷却を意味する。地表面熱フラックスはいずれの初期含水率でも初期に急激に負に大きくなり、その後緩やかに低下した。また、初期含水率が大きいほど地表面熱フラックスは大きくなった。ピーク値を比較すると、含水率の最も大きい 0.45  $m^3/m^3$  では最も小さい 0.078  $m^3/m^3$  の 2.1 倍であった。48 h の積算地表面熱フラックスは初期含水率 0.078, 0.30, 0.40, 0.45  $m^3/m^3$  で -3.42, -11.5, -14.6, -16.2  $MJ/m^2$  と含水率が大きいほど大きくなった。このように地表面熱フラックスと含水率の関係が再現できたことから、熱交換係数を凍結モデルに適用することで、より現実的な環境条件の計算が可能になることが示唆された。

融解浸潤過程については、まず、乾いた凍土に地表から連続的に給水を行った。この際、浸潤が進行するとともに、凍土の温度が試料上端から上昇した。浸潤前線より下方では、初期温度を維持する領域、初期温度から温度が上昇する領域の 2 領域が形成され、浸潤前線より上方では、0 に向かって温度が上昇する領域、0 で温度停滞する領域、0 以上で次第に温度上昇する領域の 3 領域が形成された。0 で温度が停滞する領域の長さは、いずれの給水速度においても給水量の増加にともない伸長した。含水率も給水を開始すると上端から増加した。浸潤前線の先端部は、いずれの給水速度においても給水量の増加にともない下方へ進行した。給水速度が異なっても給水量が等しければ 0 停滞領域や浸潤前線の位置が等しくなったことから、温度・水分分布は給水速度によらず給水量に依存すると考えられた。次に、乾いた凍土に 30 分毎に 6 分間ずつ 1.08  $cm/h$  で断続的に給水を行った。連続的に給水を行った場合と同様に、5 つの温度領域が形成された。0 の停滞領域の給水速度が速いほどまた連続的に給水したときほど早く伸長したが、給水量に対する変化をみると、Fig. 4 のように給水速度や頻度にかかわらず概ね一致した。浸潤前線上方の温度は連続的に給水した場合と同様だったのに対し、浸潤前線下方の温度は高くなった。断続的な給水は、連続的な給水と等量の水を与えるのに時間がかかるため、上方から熱が流入したためと考えられる。

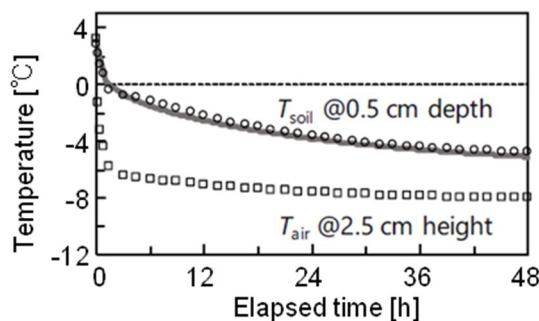


Fig. 2 Determination of heat exchange coefficient.

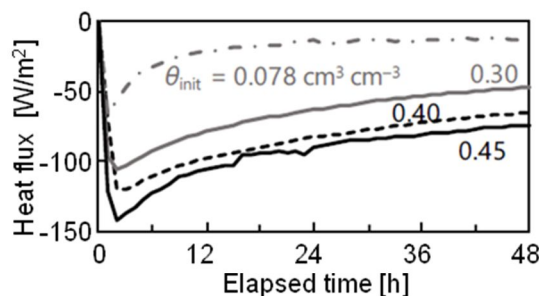


Fig. 3 Surface heat flux of the soil columns with various initial water content during freezing.

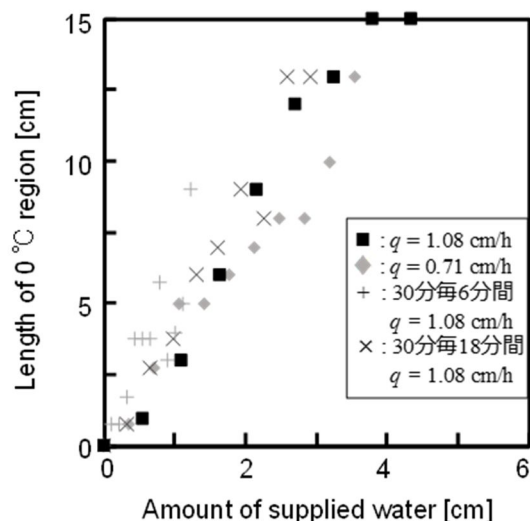


Fig. 4 Length of stagnated region at 0 °C in the soil supplied various rate of surface water fluxes.

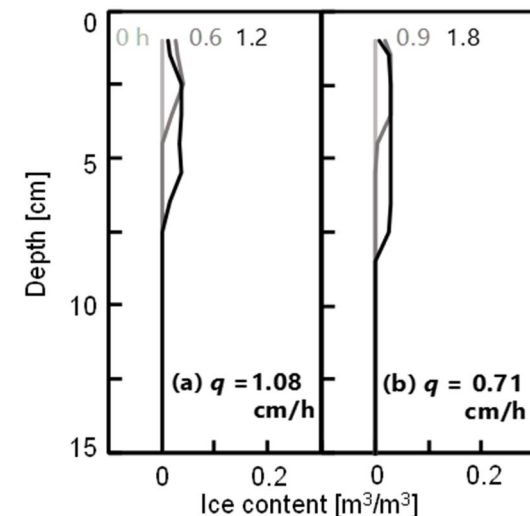


Fig. 5 Profile of ice content in frozen dry soils during infiltration.

ここで、凍土への浸潤現象を、平衡時の凍結・融解量に対する凍結割合  $f$  と融解割合  $m$  を仮定して計算した。給水速度が 1.08, 0.71 cm/h の場合、 $f=0.18$ ,  $m=0.001$  および  $f=0.15$ ,  $m=0.001$  とすると計算は実測の水分・温度分布を良く再現した。この際に算出された給水量が 0, 0.65, 1.30 cm に相当する時間の水量分布を Fig. 5 に示す。浸潤前線先端部で凍結が生じることで、水量が増加した。増加後の水量はその後一定値を維持し、上端から融解することで水量が減少した。水量一定領域は、温度分布の 0 停滞領域と一致した。水量一定領域の含水率は給水速度の低下に伴い微量であるが低下した。本研究では比較的簡易なパラメータ  $f$  と  $m$  を用いて非平衡過程の凍結融解現象を表すことに成功した。こうしたパラメータを汎用モデルに実装できるように今後更なる検討が必要である。

(2) ヘレシオセルでの凍上実験では、凍結管に冷媒を循環すると、凍結管から同心円状に凍結面が進行した。凍結面の進行は凍結初期ほど速く、その後次第に遅くなった。アイスレンズは、凍結面近傍で析出・成長を繰り返した。凍結初期よりも凍結後期に発生したアイスレンズの方が厚くなった。また、遮水剤混合率が高いほど凍結面の進行が遅く、アイスレンズも全体的に薄くなった。アイスレンズの析出・成長に伴って試料が凍上した。混合率が高い試料ほど、凍上量は抑制された。ここで、凍上速度  $V$  を凍結面の温度勾配と凍結速度  $U$  を指標に解析した。凍上速度は凍結面の温度勾配に比例した。この際の比例定数  $A$  は遮水剤の混合率を  $x$  とすると  $A = 4.22 \exp(-0.0794x) + 0.572$  と表せた。また、凍結速度については  $V = B_1U + B_2U^{0.5}$  の関係を見いだせ、 $B_1 = 0.0004x - 0.0207$ ,  $B_2 = -0.004x + 0.199$  と遮水剤の混合率と関係づけられた。

地中の構造物の地表の凍上への影響を検討した実験においても、ヘレシオセルでの実験同様アイスレンズの析出を伴う凍結面の進行と凍上現象が観察された。Fig. 6 に各実験の凍上変位分布を示す。構造物を含まない土層(i)は凍結管直上をピークに正規分布状に凍上した。一方、アクリル壁を含む土層(ii)は凍上のピークがアクリル板近傍に現れ、それより左方ではほとんど凍上しなかった。凍結管近傍から斜方への土の移動がアクリル板により制限され上方へ押し上げられたためと考えられる。また、PET シートを含む土層(iv)のピークが(ii)と異なり凍結管直上で生じたのは、PET シートがアクリル板の様に熱移動を阻害せず、柔らかく土の移動を妨げないことによると考えられる。現行の、三次元凍上予測計算法は、土層 (i) の結果をよく表した (Fig. 6 点線) が、他の実験には適用できなかった。本研究で明らかになった知見を現場の凍上予測に適用できるようにすることが今後の課題である。

(3) 有機物分解過程について、Fig. 7a, b に土中水分の移動がない試料の  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  の濃度分布を示す。 $\text{NH}_4\text{-N}$  は 0 ~ 1 cm 深で多く生成され、それ以深では生成量の違いは見られなかった。特に表層で無機化が活発に生じたとみなせる。 $\text{NO}_3\text{-N}$  は 18 日目まで検出されなかった。期間中、硝化が生じなかったといえる。深さ毎に無機化の反応速度定数  $k_{\text{min}}$  を決定したところ、0 ~ 1 cm 深では 0.05 /d、それ以深では 0.04 /d となった。Fig. 7c, d に 0.5 cm/d で水を浸透した場合の試料の  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  の濃度分布を示す。7 日目には、 $\text{NH}_4\text{-N}$  が油粕添加層で検出されたが  $\text{NO}_3\text{-N}$  は検出されなかった。また、18 日目には、 $\text{NH}_4\text{-N}$  が減少し  $\text{NO}_3\text{-N}$  が増加した。初期は無機化のみが生じ、遅れて硝化が始まったと考えられる。31 日目には、 $\text{NH}_4\text{-N}$  が殆ど検出されず、 $\text{NO}_3\text{-N}$  が下層で多く検出された。無機化が落ち着き、硝化で生じた  $\text{NO}_3\text{-N}$  が流下したといえる。ここで、土中と排液中の  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  の量を比較した。7 日目には、水分移動がない場合は  $\text{NH}_4\text{-N}$  量が約 20 mg だったのに対し、浸透時では約 40 mg だった。水分移動が無機化を促進したとみなせる。また 18 日目には、水の流れがない場合は  $\text{NO}_3\text{-N}$  が検出されなかったのに対し、浸透時には検出された。水分移動が硝化開始のタイミングを早めたと考えられる。そこで無機化促進の程度と硝化のタイミングを推定するため、浸透実験の結果の数値解析を試みた (Fig. 7 中の実線)。その結果、 $k_{\text{min}}$  は 0 ~ 1, 1 ~ 6, 6 ~ 10 cm 深でそれぞれ 0.12, 0.10, 0.05 /d、硝化の開始は 14 日目となった。0.5 cm/d 程度の降水にともなう土中の水分移動は無機化を 2 倍、硝化を 5 倍程度促進し、硝化開始を約 11 日早めることが示唆された。こうした結果について、更に温度依存性を検討し、凍土のモデルや凍土下での挙動の理解に応用することが今後の課題である。

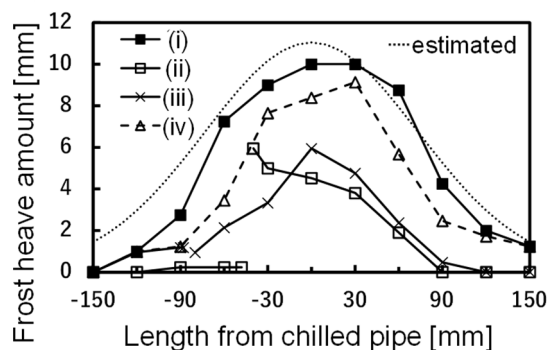


Fig. 6 Distribution of frost heaving

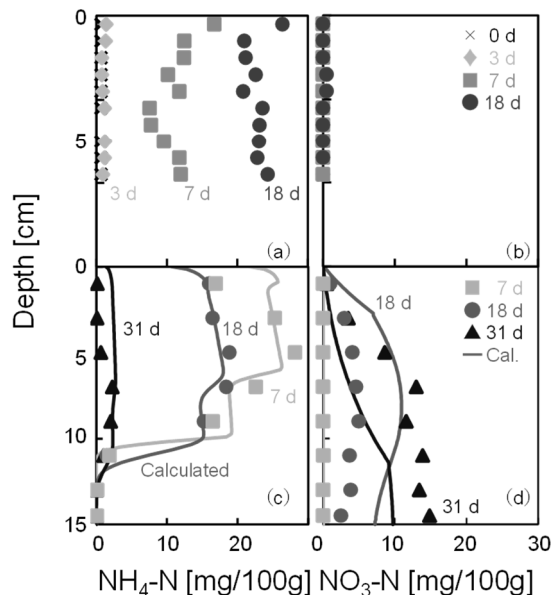


Fig. 7 Profiles of  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{NO}_3\text{-N}$ . (a)(b) no infiltration, (c)(d) infiltration with 0.5 cm/d.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 奥田涼太, 渡辺晋生	4. 巻 89
2. 論文標題 土壌水分量が異なる黒ボク土の凍結過程における熱移動メカニズム	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_173-I_180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazuyuki Saito, Kunio Watanabe, Shigenori Haginoya, Kazuo Takeda, Tetsuo Sueyoshi, Tomoyoshi Hirota, Masaru Mizoguchi, Koichiro Harada, Hiromasa Hosaka, Masato Kimura and Hironori Yabuki	4. 巻 4
2. 論文標題 Database for ground temperature and freezing depth in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polar Data Journal	6. 最初と最後の頁 83-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20575/00000016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 取出伸夫, 渡辺晋生	4. 巻 12
2. 論文標題 階層的な団粒構造が生み出す土の保水と物質移動特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 粉体技術	6. 最初と最後の頁 942-947
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 武藤由子・堂山貴広・中西真紀・渡辺晋生	4. 巻 309
2. 論文標題 蒸発過程にある黒ボク土における硝化を伴う窒素の挙動解析とATP量測定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 _281- _288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 長田友里恵・相馬啓・青木信哉・渡辺晋生	4. 巻 143
2. 論文標題 帯鋼補強土壁の交換への地盤凍結工法の適用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 17-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 渡辺晋生, 中西真紀, 草深有紀, 武藤由子	4. 巻 308
2. 論文標題 不飽和浸透過程にある異なる温度の黒ボク土中のアンモニア態窒素の硝化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_1-I_8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Kunio, Osada Yurie	4. 巻 142
2. 論文標題 Simultaneous measurement of unfrozen water content and hydraulic conductivity of partially frozen soil near 0	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Cold Regions Science and Technology	6. 最初と最後の頁 79 ~ 84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coldregions.2017.08.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 釘崎 佑樹、渡辺 晋生	4. 巻 85
2. 論文標題 土壌凍結層の融解にともなう土中の水分移動	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_191 ~ I_198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.85.I_191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 武藤由子、窪田有真、桐山直盛、渡辺晋生	4. 巻 137
2. 論文標題 圃場における土壌水分量と電気伝導率の連続観測のための5TEセンサーの簡易な原位置キャリブレーション	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 3~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.85.l_191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計54件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 佐野夕薫, 相馬 啓, 渡辺晋生
2. 発表標題 粘性土の凍結膨脹に影響する土中の水分移動に関する研究
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川村宣也, 渡辺晋生, 坂井勝,
2. 発表標題 水の浸潤にともなう黒ボク土の発熱と地温分布
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清本翼, 渡辺晋生
2. 発表標題 凍結過程にある異なるNO <sub>3</sub> -N濃度の黒ぼく土中の水分・窒素移動について
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 岡田華保, 渡辺晋生
2. 発表標題 水分量や水分移動が土中の有機態窒素の無機化と微生物活性に与える影響
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清本翼, 渡辺晋生
2. 発表標題 初期NO <sub>3</sub> -N濃度が凍結過程にある黒ボク土の熱・水分移動に与える影響
3. 学会等名 土壤物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡田華保, 渡辺晋生
2. 発表標題 水分移動をともなう土中の有機態窒素の無機化と微生物活性
3. 学会等名 土壤物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清本翼, 渡辺晋生
2. 発表標題 凍結に伴う異なるNO <sub>3</sub> -N濃度の黒ボク土中の溶質フラックスの変化
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 斉藤和之, 渡辺晋生, 萩野谷成徳, 武田一夫, 末吉哲雄, 広田知良, 溝口勝, 原田鉱一郎, 保坂征宏, 木村賢人, 矢吹裕伯
2. 発表標題 国内地温・凍結深データベース (v1.1) の作成と公開
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺晋生, 佐藤郁弥
2. 発表標題 乾いた凍土中の浸潤水の凍結・融解
3. 学会等名 永久凍土の動態解明のための多角的アプローチに関する研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumiya Sato and Kunio Watanabe
2. 発表標題 Observation of water and temperature redistribution in initially frozen sand during intermittent infiltration
3. 学会等名 2019 ASA-CSSA-SSSA Annual Meetings (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kunio Watanabe and Fumiya Sato
2. 発表標題 Temperature and water redistribution in a frozen dry soil during infiltration
3. 学会等名 Symposium on Freezing and Cold Region Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤郁弥, 渡辺晋生
2. 発表標題 凍土への浸潤が土中の水分・温度分布に及ぼす影響
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田華保, 渡辺晋生
2. 発表標題 浸潤過程にある土中の有機物分解と微生物活性
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清本翼, 渡辺晋生
2. 発表標題 凍結に伴う土中の硝酸態窒素分布の変化
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田華保, 渡辺晋生
2. 発表標題 水分移動が土中の有機物の無機化や微生物活性に与える影響
3. 学会等名 土壤物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川村宜也, 渡辺晋生
2. 発表標題 浸潤に伴う土の発熱と土質の関係
3. 学会等名 土壤物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清本翼, 渡辺晋生
2. 発表標題 凍結にともなう硝酸態窒素を含む不飽和土中の温度, 水分, 電気伝導度の変化
3. 学会等名 土壤物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤郁弥, 渡辺晋生
2. 発表標題 凍土中での浸潤水の凍結融解と給水速度や頻度の関係
3. 学会等名 土壤物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平島寛行, 渡辺晋生, Francesco Avanzi
2. 発表標題 凍結過程を考慮した3次元水分移動モデルの開発
3. 学会等名 雪氷学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤郁弥, 渡辺晋生, 平島寛行
2. 発表標題 融解浸潤にともなう凍土中の水分・温度の再分布過程の観察
3. 学会等名 雪氷学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清本翼, 渡辺晋生
2. 発表標題 凍結過程にある土中の溶質濃度分布の簡易モニター法
3. 学会等名 雪氷学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤郁弥, 渡辺晋生
2. 発表標題 断続的な浸潤にともなう凍土中の水分量と地温の変化
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田華保, 渡辺晋生
2. 発表標題 有機物分解や硝化にともなう土中のATP量の変化
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐野夕薫, 相馬 啓, 渡辺晋生
2. 発表標題 粘性土の凍結膨脹に影響する土中の水分移動に関する研究
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤郁弥, 渡辺晋生
2. 発表標題 氷点下にある成層土の浸潤に伴う水分・温度変化
3. 学会等名 農業農村工学会京都支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥田涼太, 渡辺晋生
2. 発表標題 凍結過程にある黒ボク土の熱交換係数に関する実験・解析
3. 学会等名 農業農村工学会京都支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥田涼太, 渡辺晋生
2. 発表標題 凍結実験に基づく数値解析の地表面熱境界条件の検討
3. 学会等名 土壤物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤郁弥, 渡辺晋生
2. 発表標題 浸潤に伴う凍土中の浸潤速度と水分量の変化
3. 学会等名 土壤物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kunio Watanabe and Ryota Okuda
2. 発表標題 Surface temperature boundary condition for calculating natural ground freezing phenomena
3. 学会等名 HYDRUS Workshop
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤郁弥, 渡辺晋生
2. 発表標題 成層凍土中の水分・温度分布に水の浸潤が与える影響
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥田涼太, 渡辺晋生
2. 発表標題 凍結過程にある土の地表面熱交換係数の決定手法
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 相馬 啓, 長田友里恵, 渡辺晋生
2. 発表標題 貼付凍結による凍土の成長過程の研究
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 草深有紀, 中西真希, 渡辺晋生
2. 発表標題 異なる温度の不飽和黒ボク土中のアンモニア態窒素の硝化と浸透
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤郁弥, 渡辺晋生
2. 発表標題 乾いた凍土中での浸潤水の凍結が浸潤や地温分布に与える影響
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥田涼太, 渡辺晋生
2. 発表標題 凍結過程にある黒ボク土の熱交換係数の検討
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 長田友里恵, 相馬 啓, 渡辺晋生
2. 発表標題 貼付凍結による砂中の凍土の形成・解凍過程の観察
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤由莉, 渡辺晋生
2. 発表標題 湛水土中の酸化還元電位とFeの還元に水の浸透が及ぼす影響
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 奥田涼太, 渡辺晋生, 相馬啓
2. 発表標題 TDR 法に基づく土壌凍結深計の検討
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中西真紀, 渡辺晋生
2. 発表標題 浸透過程にある不飽和土中の窒素の硝化と挙動
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松岡健介, 取出伸夫, 渡辺晋生
2. 発表標題 酸化還元反応を考慮した有機物分解モデルによる湛水土中のEh変化の考察
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 奥田涼太, 渡辺晋生, 相馬啓
2. 発表標題 貼り付け凍結管による土の凍結過程の観察
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺晋生, 伴俊和
2. 発表標題 一方向凍結過程にある不飽和土中の水ポテンシャル勾配と水分移動
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 武藤由子, 堂山貴広, 中西真紀, 渡辺晋生
2. 発表標題 蒸発過程にある土中の硝化反応速度定数とATP量の関係
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 奥田涼太, 渡辺晋生
2. 発表標題 凍結・融解実験による地表面熱境界条件の検討
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺晋生
2. 発表標題 温度分布測定に基づく凍結面への水分移動量の推定
3. 学会等名 永久凍土の変動とそのモニタリングに関する研究集会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	武藤 由子  (Muto Yoshiko)  (30422512)	岩手大学・農学部・准教授    (11201)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	奥田 涼太  (Okuda Ryota)		
研究協力者	佐藤 郁弥  (Sato Fumiya)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	岡田 華保  (Okada Kaho)		
研究協力者	清本 翼  (Kiyomoto Tsubasa)		
研究協力者	川村 宣也  (Kawamura Yoshiya)		
研究協力者	榊原 愛弓  (Sakakibara Ayumi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関