

機関番号：14101
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20589001
 研究課題名（和文） 不飽和土の凍結と凍土への浸潤にともなう土中の水・熱・物質移動機構の解明
 研究課題名（英文） Modeling coupled water, heat and solute transport in unsaturated soils during freezing and thawing with meltwater infiltration.
 研究代表者
 渡辺 晋生 （KUNIO WATANABE）
 三重大学・大学院生物資源学研究科・准教授
 研究者番号：10335151

研究成果の概要（和文）：凍土の水分および熱センサー、不凍水量や通気係数の測定装置を開発し、凍結をともなう土の諸物性を評価した。また、一次元カラム実験により、凍結・融解過程および凍結層を持つ土への水の浸潤過程における水分・熱・溶質移動と再分布を明らかにした。以上の結果を考慮した数値計算を行い、氷の成長・融解の非平衡過程を扱える凍土中の物質移動モデルを提案する一方、融解浸潤過程を再現する上での現状のモデルの問題点を整理した。

研究成果の概要（英文）： We developed moisture- and thermo-sensors, thermo-dielectric-analyzer and double-ring-permeameter, and obtained hydraulic and thermal properties of frozen unsaturated soils. We also performed directional column freezing experiments and showed the water, heat and solute transport during soil freezing/thawing, and meltwater infiltration into frozen soil. Based on these data, numerical calculations were carried out, and a coupled water and heat transport model for soil freezing process designed with non-equilibrium formation of ice was proposed. Modifying the model to simulate infiltration with soil thawing is the issue in the future.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	0	700,000
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	780,000	4,080,000

研究分野：土壌物理学・寒冷地水文学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：凍土、浸潤、水・熱移動、水分特性曲線、不飽和透水係数、不凍水、数値解析

1. 研究開始当初の背景

土壌の凍結・融解過程や凍土中への融雪水の浸潤過程にともなう、物質・エネルギー移動を理解することは、寒冷地の農地の利用や保全、バイオマスエネルギーの活用をはかる上で、また全球的な水収支やメタンガスなどの物質循環を考える上で、さらには凍土の工学的利用を進める上で重要である。しかしながら、凍土の研究はこれまで飽和土を対象とすることが多く、不飽和土に関する知見が欠

乏していた。特に、不飽和凍土への浸潤過程については、野外観測や数値モデルを用いた研究の報告はあったが、実験室レベルからその現象を定量的に理解しようという試みはなかった。また、土の凍結に関する数値解析や実験・観測は、海外では地球温暖化対策などを背景に精力的に行われつつあったが、国内の研究は立ち後れており、特に日本独特の黒ボク土（火山灰土）に関する知見は欠落していた。

2. 研究の目的

本研究では、凍土の水分量や熱物性を測定出来るセンサーや装置を開発し、これらを用いた不飽和凍土の室内実験を行うことで、凍結にともなう凍結面近傍への水・熱・溶質移動、融解・浸潤時の非平衡な相変化とそれにとともなう透水性の変化、不飽和凍土への浸潤過程と水や溶質の再配分を定量的に明らかにする。また、異なる土性や成層凍土やマクロポアを含む凍土の実験を行い、土壌物理学の数値モデルの改良を目指す。

3. 研究の方法

土の水分量測定に用いられる TDR 法について、粒子表面近傍の水の誘電率変化を考慮した混層モデルを構築し、凍土の不凍水量測定を可能とする。この際、Washington State University の Dr. Flury と討議する。また、Thermo-TDR を凍土へ活用し、凍土の不凍水量と熱物性の同時測定を行うと共に、凍土の水量推定や凍土の熱物性の水分や温度依存性を表現する数値モデルの評価を行う。次に、これまで開発してきた一方向凍結装置について、側面断熱の強化、初期水分分布の制御を可能とすべく下端のフィルターと排水構造の改良、融解浸潤時の浸潤圧や量の制御を可能とすべく上端給水構造の改良をすすめる。改良した一方向凍結装置とセンサーを用いて、砂、シルトローム、黒ボク土の凍結・融解浸潤過程における土中の水分・圧力・温度・溶質濃度分布の変化をモニターする。また、Thermo-Dielectric Analyzer を開発し、様々な試料の凝固点と不凍水量曲線を、二重管式通気度計を用いて様々な不飽和凍土の通気係数を測定し、一般的な土壌物理学的手法とあわせて、凍土の水分特性曲線と不飽和透水係数を推定する。不飽和土中の物質移動シミュレータ HYDRUS のコードを凍結を扱える用に改良し、これらの実験データを用いて、数値計算を行う。この際、凍土の水分特性曲線や不飽和透水係数関数の与え方については三重大滞在中の Dr. van Genuchten と、氷の非平衡成長については Yeal 大の Dr. Wettlaufer との討議を参考とし、HYDRUS コードの修正にはカルフォルニア大リバーサイド校の Dr. Simunek, Dr. Sakai らの協力を得る。

4. 研究成果

(1) 氷の誘電率を考慮した混層モデルを用いた TDR 法による凍土の不凍水量測定

土中には 0°C 以下に冷やされても凍結しない水（不凍水）が存在する。凍結・融解過程にある土中の水分移動を考える際には、この不凍水量を正確に知る必要がある。近年、土中の水分量のその場測定には、その簡便さから TDR 法など土の比誘電率測定を応用した手

法がよく用いられる。しかし凍土については、不凍水量が常温の土にくらべ少ないこと、不凍水の誘電率がバルクの水の誘電率と異なること、さらには氷の誘電率の影響により、常温と同様の手法では不凍水量を正確に測定することが出来ない。一方、凍土中の不凍水量測定には、核磁気共鳴実験（NMR）法がしばしば用いられる。しかし、NMR 法は土中の不凍水量の変化をその場で測定することができない。そこで本研究では、様々な不飽和度の砂、シルト、シルトローム、黒ボク土を凍結・融解し、NMR 法により不凍水量を、TDR 法により凍土の比誘電率を同時に測定した。そして、それぞれの土の不凍水量と比誘電率の関係を、土粒子表面近傍における水の比誘電率の変化と氷の比誘電率に基づき説明し、混相モデルを用いて凍土の不凍水量測定に資する検量式を提示した。図 1 にシルトロームについて測定した不凍水量と比誘電率、および提示した検量式を示す。本研究により、これまでモニターが難しかった凍土中の不凍水量、水量、全水量、温度の変化を、TDR 法を用いて正確且つ簡便に測定することが可能となった。こうした理論に基づいた上で実用的にも使いやすい検量式は、これまでは提案されておらず、本研究で提案した検量線は、今後、カラム実験のみならず、寒冷地の野外研究においても広く用いられることになるであろう。

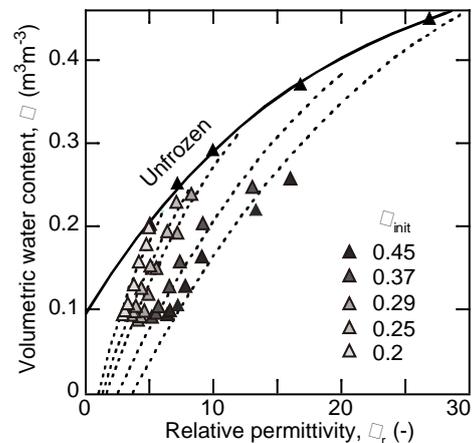


図 1 シルトロームの不凍水量と比誘電率

(2) サーモ TDR を用いた凍土の水分・熱物性同時測定

Noborio et al. (1996) は TDR センサーの導波管内に線熱源と熱電対を組み込み、土の比誘電率と熱伝導率を同時に測定できるプローブ（サーモ TDR プローブ）を開発した。本研究では、このサーモ TDR を世界で初めて凍土に適用し、 -20°C から $+20^{\circ}\text{C}$ の範囲で、塩を含む砂とシルトロームの不凍水量と熱的性質、溶質濃度を同時に測定した。この結果、温度低下にともなう土の不凍水量の減少と

熱伝導率の増加、電気伝導の減少を、サーモ TDR により同時に評価出来ることが示された。そして、熱容量の変化と不凍水量が測定出来れば、 -2°C 以下の凍土の全水量が推定出来ることが示された。サーモ TDR による凍土の水分・熱物性の測定は、特に 0°C 近傍における精度の向上が未だ必要ではあるが、実験や野外研究において今後の応用が期待される手法と言える。また、本研究では、測定結果に基づき既往の熱伝導率モデルを比較検討し、数値計算に適したモデルを選定し、各パラメータの感度を検討した。図 2 に測定した熱伝導率の温度変化と 4 種の熱伝導モデルの適合結果を示す。こうしたモデルに関する知見は、凍結・融解をともなう土中の物質移動の数値計算に用いる熱物性モデルの、今後の選定根拠となりうると考えられる。

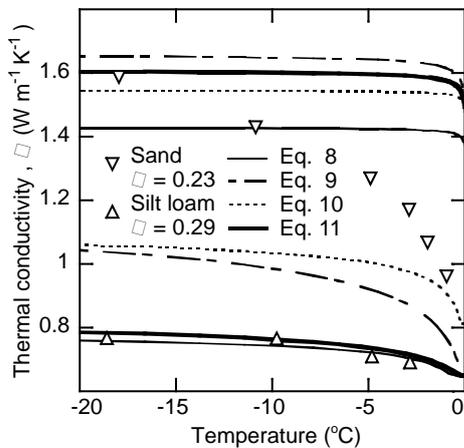


図 2 砂とシルトロームの熱伝導率

(3) 様々な不飽和土の凍結実験

土の凍結をともなう土中の水分移動を明らかにすることを目的に、本研究では直径 7 cm、高さ 35 cm のアクリル円筒カラムに、様々な不飽和度に調整した、砂、シルトローム、北海道十勝の火山灰性畑土（単層および成層）を詰め、上端から一次元凍結し、その際の温度、土中水圧力、水分量の変化を測定した。またこの際、凍土の不凍水量測定には(1)、(2)のセンサーを用いた。図 3 に異なる初期水分量の畑土（単層）を 48 時間上端より凍結した際の土中の水分分布を示す。図中、破線は不凍水量（液状水量）、実線は全水量（凍土内では不凍水量+氷量、未凍土内では液状水量）を示す。いずれの試料においても、未凍土から凍結面近傍への水分移動が生じ、凍土中の全水分量は未凍土中の水分量に比べ、高くなった。このとき、凍土中の水分量はほぼ一定となった。凍土と未凍土の水分量の差は、凍結前の水分量の差に依存したが、不凍水量は土質が等しければ初期水分量には依存せず、温度分布に依存した。凍結をともなう、土中の水分量や土中水圧の減少傾向は三

つの期間に分けられた。すなわち、未凍結状態において、凍結面への給水により水分量が減少する期間、 0° 度近傍において、水分移動と氷の相変化により水分量が減少する期間、そして 0° 度以下において不凍水量が減少する期間である。こうした期間の長さや水分量の減少傾向は、それぞれの試料の土質（水分特性曲線と不飽和透水係数）の形状によって異なった。また、成層構造を持つ試料においては、それぞれの層の土質によって凍結にともなう水分移動が異なることが明らかになった。さらに、土の凍結過程において、特に凍結速度が速い時には、凍結面近傍の土は同じ土中水圧の常温の土の水分特性曲線より多量の水を保持することが明らかになった。これは、氷の成長速度が温度の低下速度に追いついていないためと考えられた。これまで、国内外の不飽和土の凍結研究において、本研究のレベルで詳細に凍結面近傍の水分量・温度・圧力変化を測定した結果はなく、凍結過程の水分移動に初期水分量や土質が与える影響を統一的に比較した結果はない。こうした実験結果は、いままで不明瞭であった凍土の水分移動モデルの仮定の整理や検証、改良に有用であり、土壌物理的視点から、流域水文や全球的水循環まで、様々なスケールの数値計算の今後の発展に寄与すると考えられる。

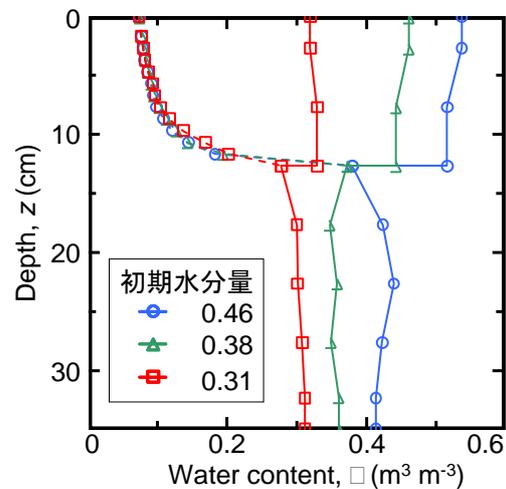


図 3 異なる初期水分量の畑土を 48h 上端より凍結したさいの土中の水分分布

(4) 凍結層を持つ土中への浸潤実験

凍結層を持つ不飽和土中への水の浸潤メカニズムと浸潤水量に与える初期水分量や浸潤水の溶液濃度の影響を明らかにすることを目的に、直径 7 cm、高さ 35 cm のアクリル円筒カラムに北海道十勝の火山灰性畑土を採土時の現場の乾燥密度で詰め、上端から 48h 凍結した。そして、3 cm の一定水頭で 2°C の水を浸潤し、その際の浸潤水量、浸潤速度、土中の温度、土中水圧力、水分量の変化を測

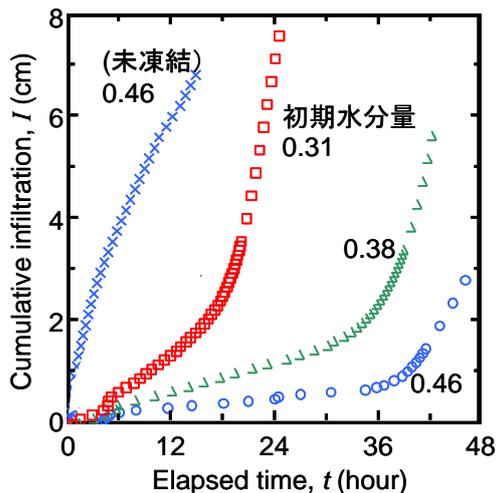


図4 異なる初期水分量の畑土を48h上端より凍結した後、2°Cの水を上端から浸潤したさいの積算浸潤量

定した。凍結層を持つ土中への水の浸潤速度は三つの期間で大きく異なった(図4)。すなわち、水が浸潤しない第一期間、未凍土よりゆっくり浸潤する第二期間、未凍土とほぼ同様の速度で浸潤する第三期間である。第一期間の継続時間は試料の初期水分量が高いほど長くなった。この期間は、試料表面の温度が低く、水の再凍結が浸潤を妨げていると考えられた。第二期間においては、浸潤前線の位置は常に0°C面の進行より先行した。このことから、水が凍結層内を浸潤しているといえる。また、第二期間の浸潤速度は初期水分量が低いほど速くなった。試料間の不凍水量に差がないことから、氷や不凍水で満たされていない空隙が凍土中の浸潤に寄与していると考えられた。第三期間では、凍結層下の水分量が急激に増加したことから、浸潤前線が凍結層下の未凍結層に達したと見なせる。また、第三期間の浸潤速度に初期水分量依存性は見られなかった。凍結層が存在するにも関わらず浸潤速度が速くなったのは、未凍土による吸引圧や凍土内の氷量の低下によると考えられた。また、凍結層消失前後の浸潤速度の変化は確認できなかった。純水のかわりに硝酸カリウム溶液を浸潤させると、溶液濃度に応じて、第一期間の継続期間が短くなり、第二期間の浸潤速度が増加した。これは、塩による凝固点降下により、不凍水量が増え、凍土内の通水断面が増加することで、凍土の透水係数が増加したためと考えられた。さらに、土の融解過程においては、融解面近傍の土の液状水量は、同じ土中水圧の常温の土の水分特性曲線より少なくなることが明らかになった。これは、氷の融解速度が温度の上昇速度に追いついていないためと考えられた。これまで野外観測から定性的に確認されていた凍土への浸潤の有無や、浸潤量に与え

る凍結前の水分量の影響を定量的に示したのは本実験が初である。また、こうした結果は、現状の凍結モデルを用いた数値計算では再現することが未だ不可能であり、今後のモデル改良の礎として重要な成果といえる。

(5) Thermo-Dielectric Analyzerの開発と凍土の凝固点・不凍水量曲線測定

凍結・融解過程にある土中の物質移動を解析するためには、土の水分特性曲線、不飽和透水係数に加え、凍土の不凍水量曲線(不凍水量と温度の関係)や凝固点を求める必要がある。しかしながら、凍土の不凍水量曲線を測定する装置は大がかりで高価である。また、測定にある程度の試料の量を必要とすることが多く、薄膜状など特殊な形状や少量の試料の不凍水量曲線を得ることが困難である。そこで、本研究ではFDR(周波数領域反射波測定)法の電極形状を工夫し、温度制御装置に組み込むことで、薄膜や僅かな量の試料の不凍水量曲線や凝固点を簡便に測定できる装置(TDA, Thermo-Dielectric Analyzer)を開発した。そして、試料の凝固点の凍結履歴や水分量依存性を実験的に。また、TDAにより砂やシルトロームの不凍水量曲線をNMR法と同程度の精度で測定できることを確認した。特に、NMR法では測定できない磁性体を多量に含む試料(黒ボク土)の不凍水量も容易に測定出来ることは、TDAの特筆すべき利点である。さらに、燃料電池や植物の葉など、これまでは測定が難しかった試料の不凍水量曲線や凝固点の測定にもTDAが有用であることを示し、これらの不凍水量曲線から低圧の水分特性曲線をも推定できる可能性を示した。TDAは今後、土に限らず様々な物質の物性測定に応用出来る可能性のある装置と言える。

(6) 二重管式通気度計を用いた不飽和凍土の透過係数測定

凍結・融解過程にある土中の物質移動を考える際には、液相だけでなく気相(ガス態)の移動も無視することはできない。このガス態の移動を解析するためには、ガス拡散係数や屈曲度に加え、通気係数を知る必要がある。しかしながら、凍土の通気係数やその水分量、温度依存性はほとんどわかっていないのが現状である。そこで、本研究では、近年積雪の通気係数測定を目的に開発された二重管式通気度計を凍土に流用し、-15~25°Cまでの昇温および降温過程において各温度の圧力勾配とガスフラックスを測定し、凍土の通気係数を算出した。まず、凍土に空気を流すと、ガスフラックスの増加とともに圧力勾配が増加した。また、ガスフラックスが3 cm/sの際は、ガスフラックスと圧力勾配に比例関係がなく、ガス移動が層流をなしていないと

推測された。土の通気係数は含水率の低下とともに大きくなった。また温度が低下すると大きくなった。これは、空気の粘性係数が温度低下と共に減少するためである。そこで、通気係数に空気の粘性係数を乗じ、固有透過度を求めた。この際、土中空気の粘性係数はバルクの空気の粘性係数より温度依存性が大きくなった。図5に各温度の試料の固有透過度を示す。固有透過度は0°C近くで不連続に変化し、未凍土より凍土で小さくなった。しかし、凍土と未凍土の固有透過度の差に含水率依存性はみられなかった。また、固有透過度には昇温過程と降温過程でヒステリシスが見られた。これは間隙における氷の成長と融解の形状や温度が昇温過程と降温過程で異なるためと考えられた。こうした通気係数や固有透過度の変化を考慮することで、春先の凍土地帯からの温室効果ガスの放出量の予測など、より詳細な寒冷圏の物質循環の解析が今後可能になると考えられる。

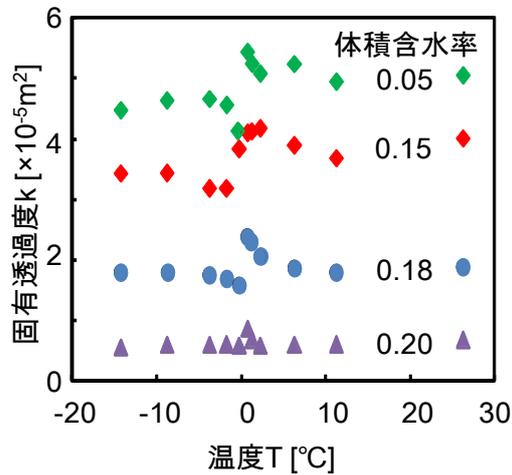
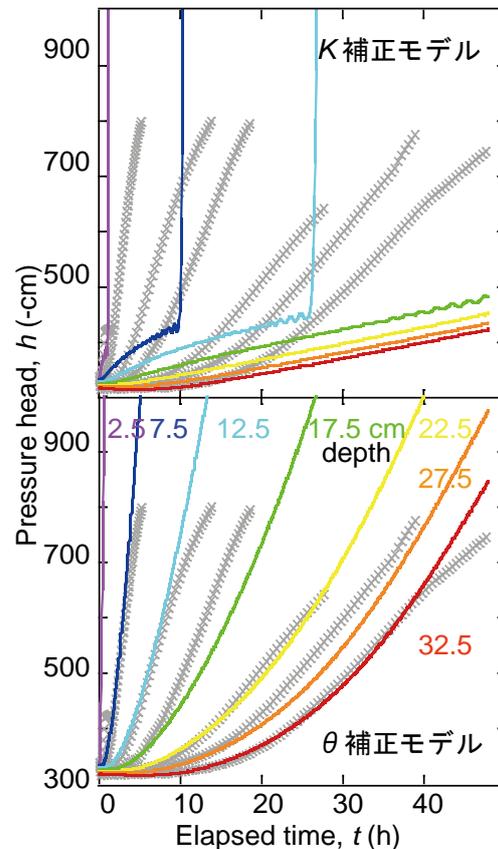


図5 異なる不飽和度の砂の固有透過度

(7) 氷成長の非平衡過程を考慮した凍土の水分移動モデルの提案と数値計算

(3)の成果により、凍結過程にある不飽和シルトローム中の温度、水分量、土中水圧分布が示され、凍土の水分特性曲線が氷の非平衡成長により常温の水分特性曲線と異なることが明らかになった。そこで、凍結過程の水分・熱移動の数値モデルとして、氷の非平衡成長に起因する水分特性曲線を用いる θ 補正モデルを提案し、(3)の実験条件に対し水分移動を数値計算した。そして、既存の2つのモデル、すなわち未凍土の水分移動特性を凍土に拡張したHarlanモデルと凍土の不飽和透水係数を水量と抑制係数で減少させる K 補正モデルと比較検討した。この結果、Harlanモデルは、未凍土から凍土への水分移動を過大評価した。 K 補正モデルは、凍結過程の水分分布を概ね再現したが、凍結面における透水係数の急激な減少のため、実測値

とは異なる液状水量と圧力水頭の極端な変化が凍結面に生じた。一方、 θ 補正モデルは、凍結時の液状水量と圧力水頭をよく再現し、より物理的に妥当な凍土の不飽和透水係数を評価することができた。図6に K 補正モデルと θ 補正モデルでそれぞれ計算した土中の圧力変化を(3)の実測値とともに示す。本研究で提案したモデルは、HYDRUSやCOUP、HAWSTなど各国で不飽和土中の物質移動の数値予測に現在用いられている計算コードに組み込みが容易であり、凍結・融解にともなう土中の水分移動の解析の精度向上が可能である。今後、凍結過程に加えて融解過程に対しても、異なる土質、初期水分量、凍結速度における水分特性曲線や凍結面近傍の透水係数の変化を検討することで、より実用的な数値予測を実現できると考えられる。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① Kunio Watanabe, Tetuya Kito, Tomomi Wake, Masaru Sakai, Freezing experiments on unsaturated sand, loam and silt loam, *Annals of Glaciology*, 査読有, 52(58), 2011, 37-43
- ② 渡辺晋生, 紀藤哲矢, 坂井勝, 取出伸夫, 凍結面近傍の不凍水量変化に基づく凍土

- の水分特性曲線と不飽和透水係数の検討,
土壌の物理性, 査読有, 116, 2010, 9-18
- ③ 取出伸夫, 渡辺晋生, 中川絢子, 土中への水の浸潤 4. 成層土, 土壌の物理性, 査読有, 116, 2010, 27-35
 - ④ 取出伸夫, 渡辺晋生, 久行雄大, 坂井勝, 土中への水の浸潤 3. Green and Ampt モデル, 土壌の物理性, 査読有, 115, 2010, 51-60
 - ⑤ 渡辺晋生, 大森陽介, 和気朋己, 坂井勝, サーモ TDR による凍土の不凍水分量・熱伝導率の同時測定, 雪氷, 査読有, 72(3), 2010, 157-168
 - ⑥ 取出伸夫, 渡辺晋生, 森崎大樹, 土中への水の浸潤 2. 初期水分量の及ぼす影響, 土壌の物理性, 査読有, 114, 2010, 71-80
 - ⑦ 渡辺晋生, 凍土中で凍らない水の測定法とモデル, 土壌水分ワークショップ論文集, 査読無, 2009, pp 21.1 - 21.8
 - ⑧ 取出伸夫, 渡辺晋生, 坂井勝, 土中への水の浸潤 1 フラックス境界と圧力境界条件, 土壌の物理性, 査読有, 113, 2009, 31-41
 - ⑨ Kunio Watanabe, Tomomi Wake, Measurement of unfrozen water content and relative permittivity of frozen unsaturated soil using NMR and TDR, Cold Regions Science and Technology, 査読有, 59(1), 2009. 34-41

[学会発表] (計 18 件)

- ① Kunio Watanabe, Tetsuya Kito Tomomi Wake, Directional freezing experiment on unsaturated sand, loam, and silt loam, International Symposium on Snow, Ice and Humanity in a Changing Climate, June 21-25, 2010, Sapporo
- ② Kunio Watanabe, Tetsuya Kito, Nobuo Toride, Martinus Th. van Genuchten, Modeling coupled water and heat transport in a freezing soil using the modified HYDRUS-1D code, ASA-CSSA-SSSA Annual Meetings, November 1-5, 2009, Pittsburgh, PA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 晋生 (WATANABE KUNIO)

三重大学・大学院生物資源学研究科・准教授

研究者番号 : 10335151