

令和 5 年 10 月 24 日現在

機関番号：92605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04681

研究課題名（和文）凍結融解による不凍水量のヒステリシスを考慮した土の熱-水-応力連成モデルの開発

研究課題名（英文）Study on heat-water-stress coupled model of soils considering hysteresis of unfrozen water due to freezing and thawing

研究代表者

陳 剣 (Chen, Jian)

清水建設株式会社技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：30556668

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：土の凍結融解過程より水量や透水係数が大きく変化するため、不凍水分量のヒステリシス現象が生じる。このような複雑な水分履歴を考慮できる熱-水-応力連成解析モデルの開発が求められる。

本研究は、多孔質体理論に基づき、核磁気共鳴実験で明らかになってきた土中の氷と水の相転移特性を、土壌凍結特性として考慮し、水分質量保存則を導入することによって、より汎用的な土の熱-水-応力連成モデルを構築した。底部給水なしと給水ありの土カラム凍結実験を実施し、温度、水分量および凍上量の解析結果と実験結果を比較することによって、構築した連成モデルを検証するとともに、凍結に伴う土中の水分、熱移動および変形特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、複雑な水分履歴を考慮できる熱-水-応力連成解析モデルの構築と検証を目的として、主に理論モデルの定式化、土のカラム凍結実験および連成解析結果の検証、を実施した。

本研究結果は、より実現象を反映する連成モデルの構築を実現するもので、自然地盤の凍上や人工凍結工法による地盤変形に関する予測精度の向上、ひいては、地盤災害の軽減に寄与すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The hysteresis phenomenon of the unfrozen water content occurs because the ice content and hydraulic conductivity change greatly due to the freezing-thawing process of soils. It is necessary to develop a heat-water-stress coupled analysis model that can consider such a complicated moisture history.

Based on the porous media theory, this study considers the phase transition characteristics of ice and water in soils, which have been clarified by nuclear magnetic resonance experiments. The phase transition characteristics were represented as soil freezing characteristic curve into the proposed model. A more versatile heat-water-stress coupled model was constructed. In addition, soil column freezing experiments with and without water supplying were conducted. The experimental and the simulated results of temperature, water content, and frost heave were compared to verify the proposed model. The effects of moisture, heat transfer and deformation properties during freezing were clarified.

研究分野：地盤工学

キーワード：連成解析 土壌凍結特性曲線 水遷移 パラメータ同定 不凍水分量

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土が 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。土の凍結現象は、限られた寒冷地域での特殊な現象と見られがちであるが、近年盛んに行われる地盤凍結工法、液化ガス地下貯蔵などに関連して、周辺地盤の凍上も問題とされている。このように、土の凍結融解現象は、寒冷地だけのローカルな話題ではなく、一般的で身近な問題なのである。

0 以下の凍土中には、表面張力、間隙の曲率、溶質の影響により、未凍結状態の水(不凍水)が存在する。地中では、温度の低下に伴い固相表面から距離が遠い水、および径が大きな間隙内の水から順に凍結し、不凍水量が減少する。この不凍水の存在なしには凍土中の水分移動は生じないため、凍土中の不凍水は最も注目すべき存在であるといえる。

凍結に伴う土中の水分移動については、土中氷の成長観察、土のカラム凍結実験に基づき、飽和状態における土の熱-水-応力連成凍上モデルの開発が進められてきたが、凍結融解過程より氷量や透水系数が大きく変化するヒステリシス現象が生じるとともに、飽和状態の未凍土中の水が凍土へ引き寄せられ、局所的な不飽和状態になる可能性があると考えられる。上記のような飽和状態から不飽和状態への水分履歴を考慮できるモデルの開発はほとんどなされていない。

2. 研究の目的

本研究は上記の背景に鑑み、多孔質体理論に基づき、核磁気共鳴実験で明らかになってきた土中の氷と水の相転移特性を、水分質量保存則として考慮し、凍結融解による不凍水量のヒステリシス特性を連成解析モデルに導入することによって、より汎用的な土の熱-水-応力連成モデルを開発することを主な目的として、以下の研究を行う。

- (1) 凍結にともなう土中の水・熱移動特性を測定するための一次元カラム凍結室内実験の実施および熱-水-応力連成方程式の定式化
- (2) 凍土の不凍水分量のヒステリシス特性を考慮できる土壌凍結特性曲線に基づく水・熱連成解析モデルのパラメータ同定に関する手法の構築とその適用性検証
- (3) 凍土の圧縮強度に関する力学特性モデルの構築および凍結地盤における連成解析の実施

3. 研究の方法

(1) 土の一次元カラム凍結室内実験の実施

室内実験では、初期質量含水率 20% のシルト質粘土と 12% の細砂を用いて、底部給水あり(開放型)と給水なし(密閉型)、頂部凍結の一次元凍結条件下で、土中温度、含水量、凍上量の変化を明らかにすることを目的に、一次元カラム凍結実験を行った。用いた粘性土と砂質土の試料を 5 層に分けて、乾燥密度 1.64g/cm^3 で、直径および高さともに 10cm のアクリル円筒カラムに詰めた。土カラムの底部より 1, 3, 5, 7, 9cm 高さにカラム壁面から熱電対を挿入し、熱電対により凍結期間中の土中温度を測定すると共に、頂部円盤上面の上方への変位量を、変位計によって測定した。また、所定の時間凍結した後、供試体を取り出し、それぞれ 2cm ごとに切断して各々の含水比を測定した。

(2) 土壌凍結特性曲線に基づく熱-水-応力連成モデルの構築

核磁気共鳴実験で得られた土の凍結融解による不凍水量のヒステリシス特性を、土壌水分特性方程式である van Genuchten 式と相平衡状態方程式であるクラウジウス-クラペイロンクラペイロン式の未知パラメータ同定に適用し、土壌凍結特性曲線を導出した。さらに、連続力学に基き、土の熱-水-応力連成モデルの定式化を行った。

(3) 一次元カラム凍結実験における連成解析の実施

(2) で開発した連成解析モデルを用いて、(1) で実施した土の一次元カラム凍結実験において、連成解析を行った。また、実験計測データと数値解析結果との比較を行い、構築した連成モデルの合理性を検証した。

4. 研究成果

(1) 土の一次元カラム凍結室内実験の実施

土の一次元カラム凍結室内実験装置の概略図を図 1 に、実験装置の写真を図 2 に示す。

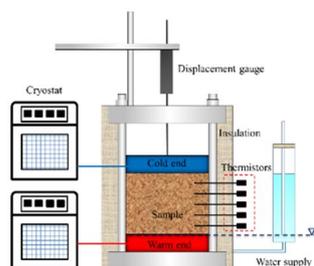


図 1 実験装置概略図



図 2 実験装置写真

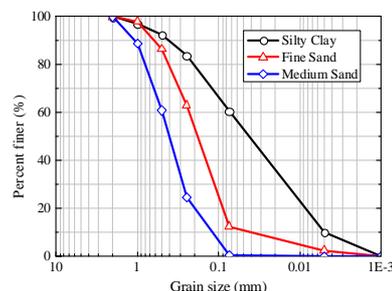


図 3 土の粒径加積曲線

表 1 実験条件

ケース No.	土質条件	給水条件	初期含水率 %	頂板温度	底板温度	環境温度
1	シルト質粘土	給水なし	20	-3	1	1
2	シルト質粘土	給水あり	20	-3	1	1
3	細砂	給水なし	12	-3	1	1
4	細砂	給水あり	12	-3	1	1

実験に用いたシルト質粘土、細砂の粒径加積曲線を図3に、実験条件を表1に示す。凍結実験では、初期質量含水率20%のシルト質粘土と12%の細砂を用いた。給水なし(密閉型)と底部給水あり(開放型)、頂部凍結の一次元凍結条件下で、土中温度、含水量、凍上量の計測を行った。

給水なしおよび給水あり条件において、土カラムの底部より1, 3, 5, 7, 9cm高さの土中温度の時間変化を図4および図5に示す。これらの図から、土カラム各点の温度変化の傾向は基本的に同じであり、各温度曲線は急速な低下段階、緩やかな低下段階および安定段階を経ていることが分かった。凍結端部である頂板に近いほど温度低下が大きくなる。給水なし条件では、シルト質粘土の温度が一定温度に達するまでに約15時間、細砂の温度が一定温度に達するのに約10時間がかかった。これは、細砂の初期含水率はシルト質粘土より小さく、氷形成の潜熱はシルト質粘土より小さいため、供試体の温度は早く安定すると考えられる。また給水あり条件では、シルト質粘土や細砂の温度が一定温度に達するまでの時間は給水なし条件に比べて若干長くなった。これは、暖かい端部で給水することでより多くの水が氷になり、放出された熱は土の冷却を遅らせたためである。

給水なしおよび給水あり条件において、凍結後土カラムの高さにおける含水量分布を図6および図7に示す。図6および図7から、凍結前の供試体の含水量は均一であるのに対し、凍結後は未凍結部の含水率が減少し、凍結部の含水率が増加していることが分かった。これは、給水を行わなくても、土壌水のポテンシャル勾配や温度勾配によって未凍結部から凍結部へ水が遷移していると考えられる。また、細砂の遷移水量はシルト質粘土より低くなっている。これは、細砂の比表面積がシルト質粘土よりも小さく、土の間隙に存在する水は主に毛細血管水であり、凍結による細砂の間隙にある毛細血管水の遷移量がシルト質粘土より少ないためである。

凍結後土の凍上量を図8に示す。給水なしの場合、粘土の凍上量は細砂のおおよそ2.5倍に対し、給水ありの場合、細砂より粘土の凍上量は10倍大きくなることが観測された。

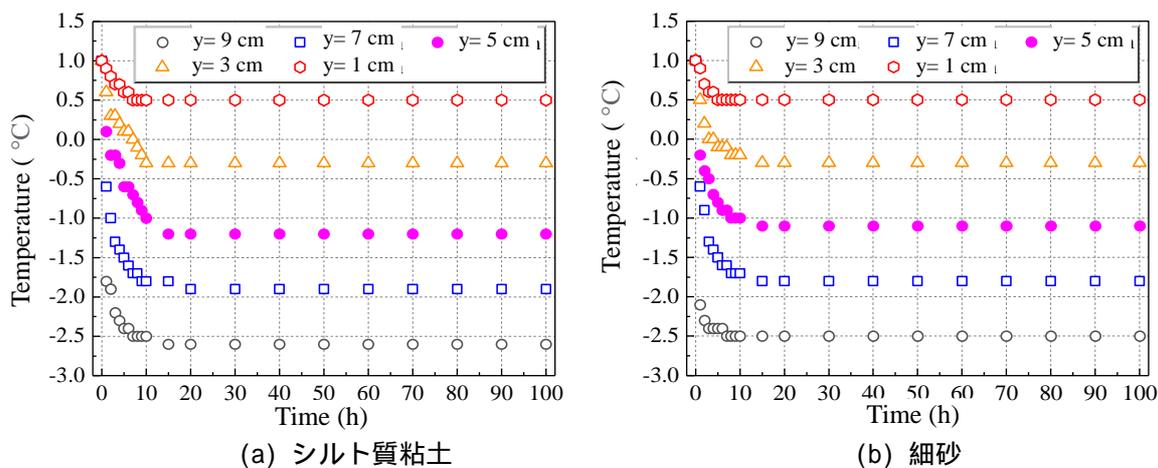


図4 給水なし条件における土中温度の時間変化

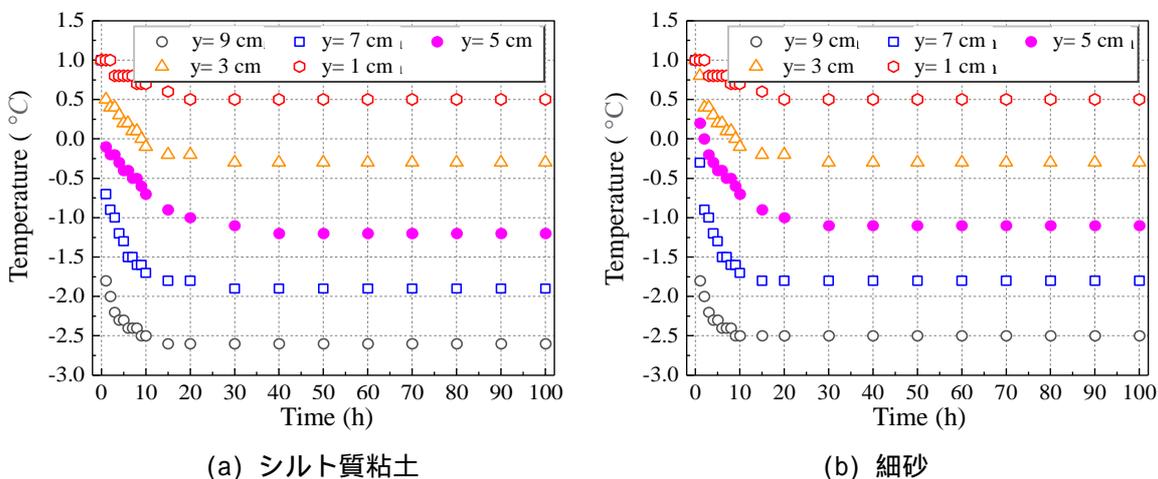
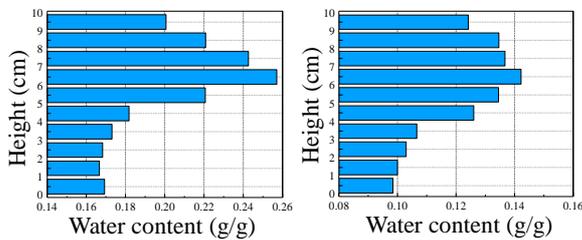
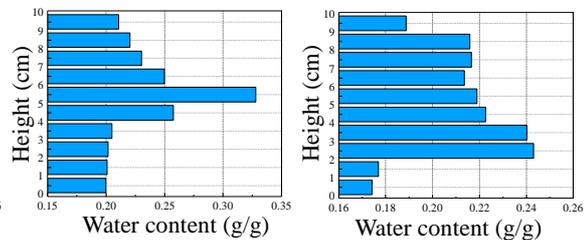


図5 給水あり条件における土中温度の時間変化



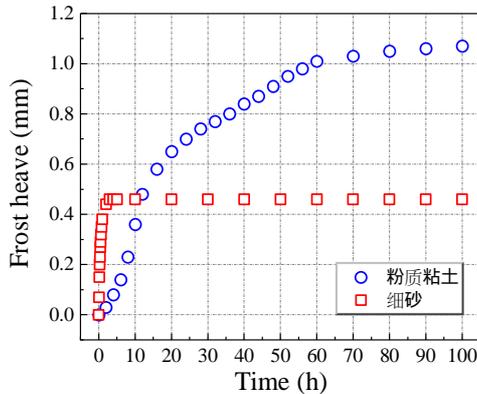
(a) シルト質粘土 (b) 細砂

図6 凍結後土中の含水量分布（給水なし）

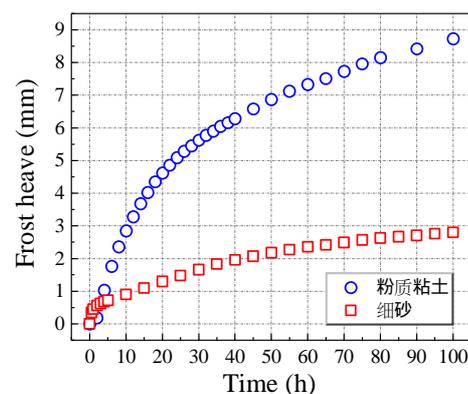


(a) シルト質粘土 (b) 細砂

図7 凍結後土中の含水量分布（給水あり）



(a) 給水なし



(b) 給水あり

図8 凍結後土の凍上量

(2) 土壌凍結特性曲線に基づく熱-水-応力連成モデルの構築

凍結による土中の不凍水分量のヒステリシス特性を計測するために、初期含水率 33%の土サンプルを用いて、核磁気共鳴法 (P-NMR) 実験を実施した。P-NMR 実験装置は、サンプル管、磁石ユニット、高周波システム、温度制御システムおよびデータ収集システムで構成される。実験手順は次の通りになる。土を乾燥炉で 115 の温度で 12 時間乾燥させた。指定量の蒸留水を土サンプルに添加し 24 時間保持して土サンプル内の水分を確実に均一分布させた。直径 9.04mm、高さ 30mm の円筒形サンプル管内に土サンプルを詰め込んだ後、サンプル管を P-NMR 装置に設置し、降温過程では、1, 0, -0.5, -1, -1.5, -2, -2.5, -3, -4, -5, -6, -8, -11, -14, -17 の順で行った。土サンプルの体積が小さいため、土サンプル内の熱平衡状態になるまで、各温度で 15 分間のみを保持した。各温度で測定された最初のパルス振幅を取得し、キュリーの法則に基づき、各温度での不凍水分含有量を求めた。

また、土壌水分特性方程式である van Genuchten 式と相平衡状態方程式であるクラウジウス-クラペイロンクラペイロン式を用いて、土壌凍結特性曲線を導出した。図 9 は、P-NMR 実験結果による土壌凍結特性方程式の未知パラメータ同定結果である。

上記で得られた土壌凍結特性曲線に基づき、図 10 の熱-水-空気連成モデルの概要図に示すように、下記の仮定で熱-水-空気-応力の連成モデルを構築した（引用文献 , ）。

凍土および未凍結領域は連続体として取扱う。

凍土領域において水と乾燥空気しか通せない。

気相（水蒸気、空気）が理想気体とみなせる。

凍結面を含めて凍土領域において、間隙氷圧、間隙水圧および温度の間にはクラウジウス-クラペイロンの式が成り立つ。

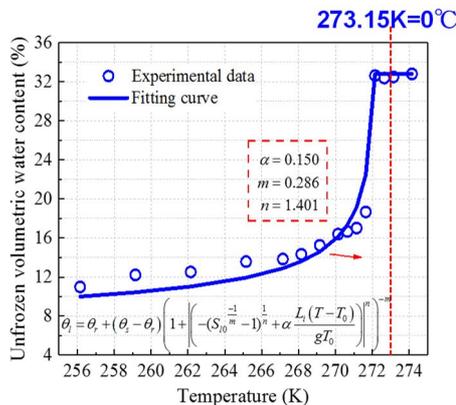


図9 P-NMR 実験による土壌凍結特性曲線

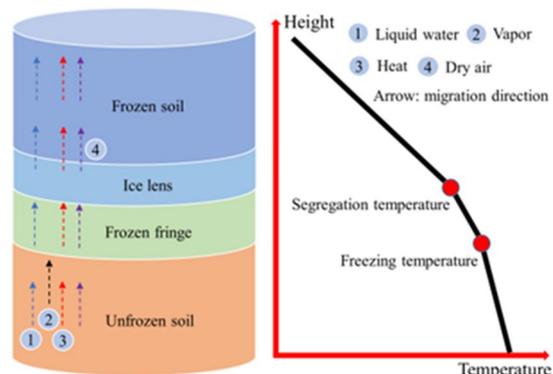
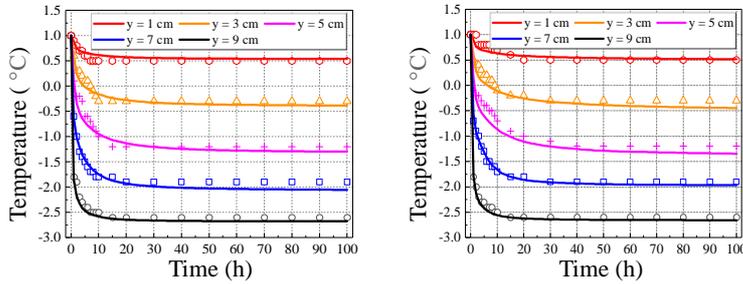


図10 熱-水-空気連成モデルの概要図



(a) 給水なし (b) 給水あり
 図 11 土中温度の解析および実験結果

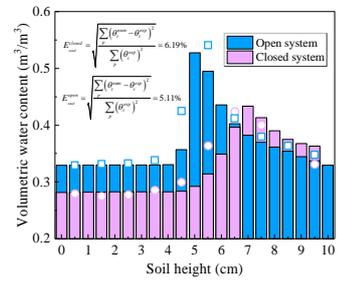
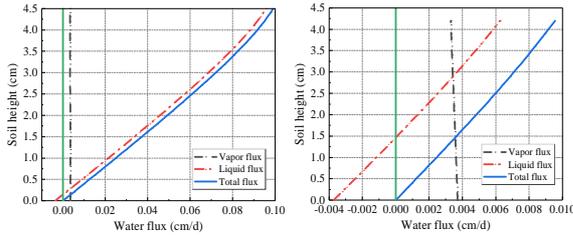
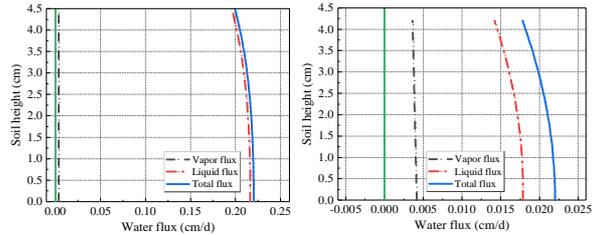


図 12 凍結後土中の水分量



(a) t=20h (b) t=100h

図 13 土中のフラックス分布 (給水なし)



(a) t=20h (b) t=100h

図 14 土中のフラックス分布 (給水あり)

(3) 一次元カラム凍結実験における連成解析の実施

上記で構築した連成方程式を用いて、土のカラム凍結実験における連成解析を実施した。

給水なしおよび給水ありシステムにおける温度場の解析結果および実験結果との比較は図 11 に示す。凍結過程において、温度の解析結果は実験結果とよく一致していることが確認できた。

凍結後における土中の水分量分布について、給水なしおよび給水ありシステムにおける解析結果と実験結果の比較を図 12 に示す。図 12 に示すように、凍結後の水分量解析結果は実験結果と概ね一致していること、また、凍結に伴って、土中の水分が凍結前線へ遷移し、未凍土での水分減少と凍土での水分増加が生じていることが分かった。

図 13 および図 14 は、凍結初期 (20h) および凍結終了時 (100h) に未凍土領域における土中の液状水および水蒸気のフラックス分布を示す。これらの図からは、下記のことが分かった。

給水なし条件において、全水分フラックスは常に上向きであり、凍結面へ向かって線形増加し、凍結面において最大値に達する。また、液状水フラックスは、基本的に上向き、暖かい下端近くで下向きの移動を示す。

給水あり条件では、下端から給水のため、下端において全水分フラックスが最大値になる。

水蒸気フラックスは、給水条件に関係なく、未凍土においては上下ほぼ等しく分布している。

凍結とともに、水蒸気フラックスが全水分フラックスに占める割合は増加する。

給水あり条件において、液状水フラックスが大きいため、水蒸気フラックスの影響は小さい。

最後に、図 15 に示すように、給水なしおよび給水あり条件において、凍上量の解析結果は実験結果と概ね一致していることが分かった。

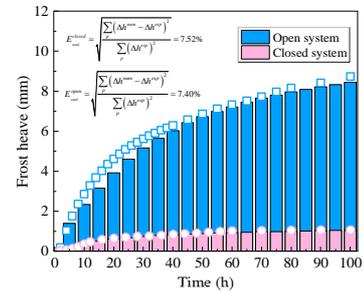


図 15 土カラムの凍上量

(4) まとめ

本研究は、多孔質体理論に基づき、核磁気共鳴実験で明らかになってきた土中の氷と水の相転移特性を、土壌凍結特性として考慮し、水分質量保存則に導入することによって、より汎用的な土の熱-水-応力連成モデルを構築した。

底部給水なしと給水ありの土カラム凍結実験を実施し、温度、水分量および凍上量の解析結果と実験結果を比較することによって、構築した連成モデルを検証するとともに、凍結に伴う土中の水分、熱移動および変形特性を明らかにした。

本研究は、より実現象を反映する連成モデルの構築を実現するもので、自然地盤の凍上や人工凍結工法による地盤変形に関する予測精度の向上、ひいては、地盤災害の軽減に寄与する。

<引用文献>

Zhiming Li, Jian Chen, Aiping Tang, Mitsutaka Sugimoto, A novel model of heat-water-air-stress coupling in unsaturated frozen soil, International Journal of Heat and Mass Transfer, 175:121375, 2021.

Zhiming Li, Jian Chen, Mitsutaka, Sugimoto, Pulsed NMR measurements of unfrozen water content in partially frozen soil, Journal of Cold Regions Engineering, 34(3):04020013, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Li Zhiming, Chen Jian, Tang Aiping, Sugimoto Mitsutaka	4. 巻 175
2. 論文標題 A novel model of heat-water-air-stress coupling in unsaturated frozen soil	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121375	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 該当する
1. 著者名 Li Zhiming, Chen Jian, Sugimoto Mitsutaka, Mao Chaojun	4. 巻 34
2. 論文標題 Thermal Behavior in Cross-Passage Construction during Artificial Ground Freezing: Case of Harbin Metro Line	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cold Regions Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(asce)cr.1943-5495.0000221	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 該当する
1. 著者名 Li Zhiming, Chen Jian, Sugimoto Mitsutaka	4. 巻 34
2. 論文標題 Pulsed NMR Measurements of Unfrozen Water Content in Partially Frozen Soil	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cold Regions Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(asce)cr.1943-5495.0000220	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 該当する
1. 著者名 Li Zhiming, Zhou Yundong, Chen Jian, Sugimoto Mitsutaka	4. 巻 26
2. 論文標題 Modified Statistical Damage Constitutive Model for Frozen Sand Based on Nonlinear Strength Criterion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 KSCE Journal of Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 4467 ~ 4477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12205-022-2096-8	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 該当する

1. 著者名 Li Zhiming, Tang Aiping, Chen Jian, Zhou Yundong	4. 巻 191
2. 論文標題 Analytical solution for the steady-state temperature field of a linear three-pipe freezing system under hydrodynamic conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Thermal Sciences	6. 最初と最後の頁 108378 ~ 108378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108378	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 該当する

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 陳剣、杉本光隆
2. 発表標題 Coupled Thermal-Hydro Analysis for Unsaturated Frozen Soils
3. 学会等名 土木学会年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森山哲成、陳剣、杉本光隆
2. 発表標題 パルス核磁気共鳴法 (P-NMR) を用いた凍結融解時における土壌の不凍水分量測定
3. 学会等名 第38回 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2020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	杉本 光隆 (Sugimoto Mitsutaka) (50196755)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	

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
研究分担者	豊田 浩史 (Toyota Hirofumi) (90272864)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	

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