

令和 2 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18871

研究課題名（和文）凍結・融解による土の不可逆変化メカニズム解明へ、ミクロ～メソ可視化からの突破口

研究課題名（英文）Exploration of irrecoverable state change mechanisms due to freeze-thaw cycles by micro- to mesoscopic visualisation

研究代表者

西村 聡（Nishimura, Satoshi）

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70470127

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,600,000円

研究成果の概要（和文）：地盤材料、特に粘土などの細粒土が凍結・融解を繰り返す際には、長期的（排水条件）には体積の変化、短期的（非排水条件下）には有効応力の変化など、不可逆な状態変化が起こる。この現象のメカニズム解明を経て、都市部インフラ整備の補助工法としての人工凍結工法適用に伴う地盤変形の解析や、寒冷地防災・インフラ維持管理技術の発展に有用な土質モデルを構築することを目的として室内土質試験・マイクロフォーカスX線CTスキャン・要素モデル化などを含む多面的な研究を実施し、実際の工学的解析に適用できる数値モデルを開発するとともに、入力パラメタの推定に必要な実験手法の骨子をまとめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、都市部で用いられる人工凍結工法や寒冷地の自然凍結融解過程による地盤変状など、土の凍結・融解に関わる問題を統合的・一般的かつ定量的に評価するモデルは大成しておらず、その前提となる、土の凍結・融解時の構造変化等への理解も不完全である。本研究は、高解像度X線CTなど最新の技術を適用することで、凍結による土の状態変化の重要なメカニズムを絞り、それにより合理的かつ汎用的な土の凍結・融解モデルを開発した。これにより、インフラ建設補助工法の適用可能性や設計の合理化の検討に対し、他の工学分野同様に数値解析を用いる基礎が築かれたといえる。

研究成果の概要（英文）：Freeze-thaw cycles in soils, fine-grained soils in particular, cause irrecoverable state changes manifested as volume changes in long-term (i.e. drained conditions) and/or effective stress changes in short-term (i.e. undrained conditions). Understanding the mechanisms and developing capability of describing these processes are crucial in many engineering context, such as artificial ground freezing for infrastructure development in urban areas or ground instability in cold regions. This research approached to the soil freeze-thaw problems first by updated laboratory tests involving microfocus X-ray Computed Tomography of freeze-thaw processes and observing the micro- to meso-sopic behaviour of soils. An analytical model was then developed that can described the soil behavior along any arbitrary freeze-thaw history. The achievement represents an important progress in developing an integrated analytical model of soil freezing and thawing for general engineering purposes.

研究分野：地盤工学

キーワード：土質力学 凍結 融解 地盤材料 可視化 地盤変形

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土は凍結・融解サイクルにより大規模な残留変形を起こす。寒冷地では、この変形が融雪期の斜面不安定化や、周氷河地形における風化層の生成を通して多雨期の地盤不安定化につながっており、このことは2016年8月の北海道豪雨時に100近い地点で起こった斜面崩壊事例で新たに認識された。一方、人工凍結では、融解時のこの不可逆現象を説明・予測できないことが工法適用上の最大の懸念となっている。人工凍結技術の発展に対するニーズは近年増しており、この背景に、福島第一原子力発電所の凍土壁といった社会的影響の大きい事業の存在に加え、凍結技術の向上や地下空間利用の高度化により、予測・制御が難しい薬液注入の先にある「最後の手段」として凍結工法への期待の高まりがある。しかし、融解過程の本質的な研究は滞留しており、近年の実験装置・手法の飛躍的な進歩の恩恵を受けていないというのが、本研究開始当初の状況であった。

残留変形発生メカニズムに対しては仮説が多く存在する。主要なものは、(i) 凍結・融解による粒子自体の変質、(ii) 凍結前線付近で凍結直前に起こる応力変化、そして Nixon & Morgenstern による (iii) 微小アイスレンズ生成による不均質化である。(i) (iii) と (ii) は、マクロな物性が不可逆変化を起こしているのか、あるいは単なる状態変化なのか、という本質的相違がある。これらの推測の真偽を明らかにせずに凍結融解サイクル時挙動を合理的に説明・モデル化することは不可能である。凍土に対しては、従来の非凍土力学のように、要素力学試験に基づく現象論から連続体モデル化に終始するアプローチからの修正転換が必要であった。

2. 研究の目的

本研究は、種々の原位置状態で凍結・融解をうける土の工学的性質の変化とそのメカニズムをミクロ～メソスケール構造変化の視点から本質的に理解し、大規模な地盤残留変形や崩壊につながる凍土融解時のマクロ挙動の合理的な記述と予測法の確立に寄与することを目的とする。新たな手法として、マイクロフォーカス X 線 CT・核磁気共鳴 (NMR) プローブなど、従来の土質試験を超えた大規模装置・技術・ノウハウを新しく統合的に利用することで、これまで推測の域を超えていなかった凍土の内部変化過程を新しい切り口で可視化し、解明する。特に、凍土特有の自発的な間隙水内部移動による不均質化に着目し、従前の均質・連続体としての非凍土力学にはないこの現象を定量化することで、凍土研究の行き詰まりを打破し、人工凍結を用いた高度な地下空間利用や寒冷地地盤災害予測に広く波及する基盤技術の再構築につなげる。研究開始当初の最低限の目標はあくまで微細スケールでの凍結・融解による土質構造変化の可視化・理解であったが、順調な進捗により、最終的にマルチスケール数理モデル化まで目的に含めることとした。

3. 研究の方法

研究方法として、申請調書に記したものをほぼ想定通り進めることとなった。その後の理論整理により、用いる語彙に多少変化があるものの、これらをまとめると、

(1) 凍結・融解時の土のメソスケール (供試体スケール) での不可逆変形挙動の観察

高解像度画像解析やマイコンによる自動フィードバック制御など最新の実験計測・制御技術を導入し、一次元凍結・融解試験を体系的に行い、残留変形を定量化した。特に、間隙比と応力に関する凍結・融解サイクル後の「残留状態線」と、それに至る過程に着目し、既往の研究とは異なる形で結果を整理した。上載圧 (0~800kPa)・温度変化履歴 (緩速・急速変化)・土質 (粒度・塑性)・応力履歴 (過圧密日) を変数として幅広い条件を設定し、再現性確認試験も含めて多数の試験を実施した。

(2) 凍結・融解時に伴うミクロ～メソスケールの土質構造変化の可視化

X 線 CT 下で凍結・融解試験を行い、局所的な密度変化を観察した。X 線 CT の分解能は $24\mu\text{m}$ であり、今回用いた粘土に対しては粒子レベルまで分解することはできなかったが、マイクロ～メソ間の遷移的スケールにおいて土質構造変化の可視化を試みた。可視化にあたっては各種フィルタリングやモルフォロジー変換などを試行し、構造変化の定量化に努めた。X 線 CT 装置は京都大学が所有するものを利用し、拘束圧下での凍結・融解の再現にはミニチュア版一次元凍結・融解装置を新たに設計・製作した。

(3) 凍結・融解履歴時による内部水理特性の変化

凍土の特性を支配する重要な因子である、土内部の水理特性を定量化した。特に不凍水分曲線は、マクロとミクロのスケールをつなぐものであり、その同定はそれ自体が大きな技術的挑戦でもある。本研究では、不凍水曲線の同定には苫小牧高専が所有する核磁気共鳴 (NMR) 装置を利用した。以上、(1)~(3)には、笠岡粘土・カオリンという塑性・水理特性が大きく異なる二種の粘土を用いた。

(4) マルチスケール数理モデルによる凍結・融解挙動の記述

熱・水・土連成数値解析に適用できる増分形の凍結・融解モデルをマルチスケールの視点から構築し、実験結果に対してその記述能力を確認した。

4. 研究成果

(1) 新しい凍結・融解装置の開発¹⁾

X 線の供試体までの透過を許し、かつ X 線室内で遠隔制御のもと急速に一次元凍結・融解試験

を行うための装置（図1）は、本研究ではあくまで目的達成のためのツールという位置付けではあるが、非常に廉価（10万円程度で製作可能）でありながら制御・試験実施が容易なものを開発したため、これ自体を一つの成果と考える。今回の研究では凍結・融解特性の調査とモデルのパラメタ同定のためのルーチンを提案するに至ったが、本装置も同パッケージの一部として提案するものである。本装置では、厚さ10~20mm程度の供試体を3~5分程度で内部まで凍結することができ、アイスレンズ形成を許さずに均一な凍結供試体を生成することができる。

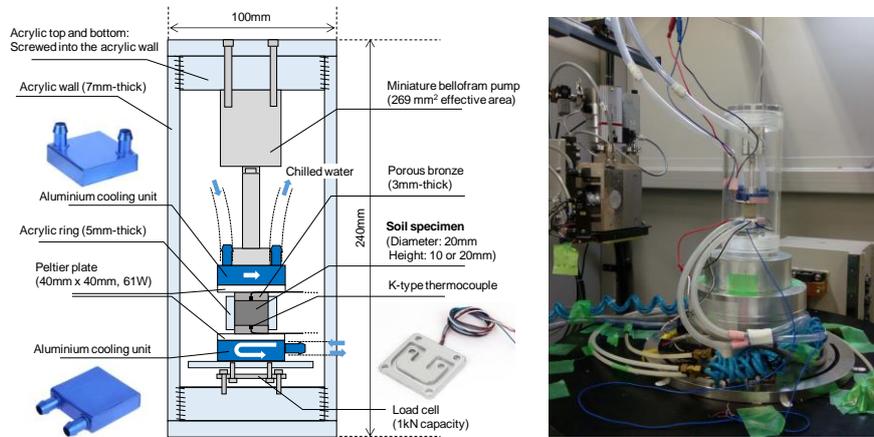


図1 新規開発した一次元急速凍結融解装置

(2) 凍結・融解に関わる状態特性曲線の存在確認¹⁾

メソスケールで均一な要素としての供試体を作製することで、供試体全体に対して観測した密度や応力などの状態量・状態変数を用いて状態を記述することが可能となった。研究の方法(2)で述べた一連の室内試験により、凍結・融解を繰り返すことにより、土の状態は個々の土質に特有の特性曲線に収束することを確認した。この特性曲線を凍結融解残留線（Freeze-Thaw Residual Line: FTRL）を定義し、現状態とこのFTRLとの比体積（あるいは間隙比）の差分を凍結融解状態パラメタ ψ_{ft} として用いることで、任意の状態からの凍結・融解サイクルによる体積変化を予測するチャートを作成した（図2）。これに際して、三軸応力状態で全面から凍結を行うなどの方法を用いると、せん断変形によるダイレタンシーが生じ、正しく体積変化量が評価できないことも示した。この体積変化量 ψ_{ft} の相関について、後述のX線CTによる観察に基づくメソスケールモデルの解析により物理的な意味を確認した。FTRLは後述の凍結・融解モデルの中心的な概念として提案するものである。

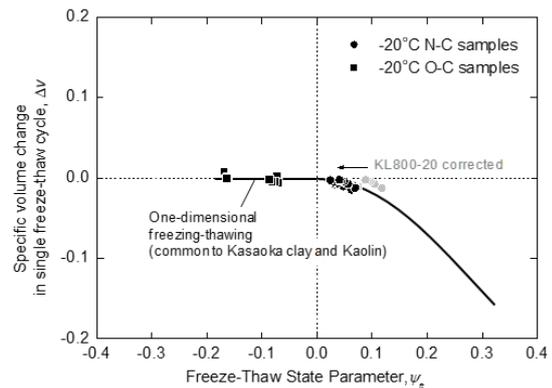


図2 サイクル毎の比体積変化量と ψ_{ft} の関係の例

(3) X線CTによるマイクロ～メソスケール構造変化の定量化

高塑性の笠岡粘土供試体を中心として、異なる拘束圧や温度（よって、それに応じた凍結速度）で凍結・融解試験を行い、凍結前・凍結後・融解後およびこれら5サイクルの後など主要なタイミングでX線CTを行い、各種画像解析・分析を行った結果、以下の知見が得られた。①400kPaなど、工学的にある程度高い拘束圧下では、人工凍結工法に密接に関連する0.05°C/secといった大きな凍結速度に対しては、24 μ m分解能のメソスケールでの構造変化（微細なアイスレンズや収縮クラック生成など）は全く生じていなかった（図3上段）。これにも関わらず、融解時には多大な不可逆体積変化が生じていた。②このとき、密度を示すCT値のヒストグラムに見られるように、メソスケールで見た土のマトリクスは凍結・融解に全体として均一に密度を変化させており（ヒストグラムの平行移動）、不可逆変化の物理過程は、X線CT分解能以下のマイクロスケールで起こっていると推察される。逆に言えば、低拘束圧下や緩速凍結・融解時に目視で確認されるメソスケールの構造変化（図3下段）は、土全体としての体積変化に対しては本質的に重要な過程ではないといえる。

(4) 凍結・融解をうける粘土のモデル²⁾

上記(2)(3)の室内試験結果・X線CTによる物理過程の観察をうけ、これらの知見と矛盾せず、また同時に工学的に有用で実用性の高い数理モデルをマルチスケール解析より構築した。ここでは、Binary mesostructureモデルと呼ぶ単純化・理想化されたメソスケールでの土質構造を

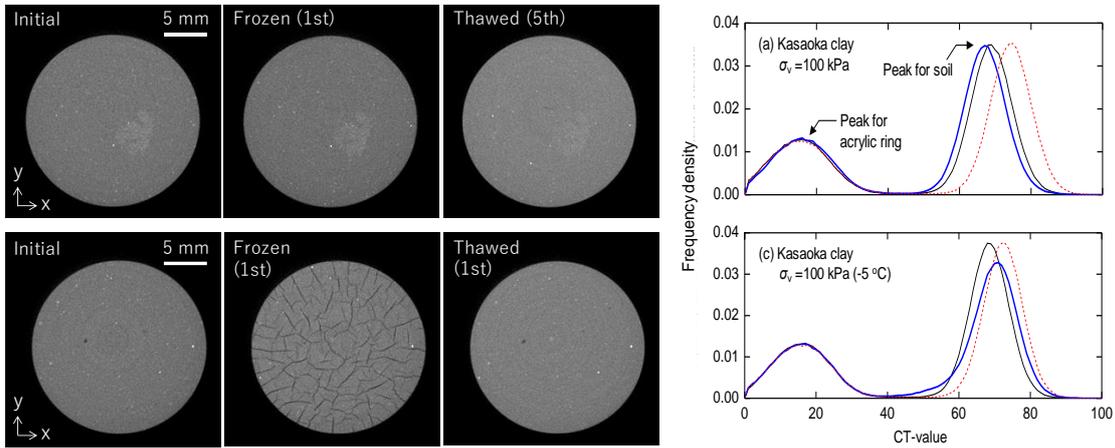


図3 X線CTによる水平断面（凍結方向に直交）の構造変化とCT値の変化
 (上段：100kPa, -20°Cまで急速凍結；下段：100kPa, -5°Cまで緩速凍結)

仮定し、Domain 1とDomain 2という二つの領域で異なる土質特性を過程し、凍結時に両者で間隙水ポテンシャルが等しくなる平衡状態を解析により求めた。パラメトリック解析を加え、この平衡状態の温度依存性や応力依存性といった特性を理解したうえで、メソスケールで定式化した。この定式化された平衡状態は、非体積-有効応力関係において凍結平衡曲線 (Freeze Equilibrium Line: FEL) と定義し、先に述べたFTRLと合わせて、モデル上の重要な特性曲線である。具体的な定式化は文献2)に譲るが (同文献中ではまだFELの概念は提起しておらず、さらに発展させたモデルについては現在公表準備中である)、これにより凍結・融解過程中の任意の状態、その時々刻々の不可逆体積変化速度を算出するモデルを構築した。これは言い換えれば、従来の連続体力学・弾塑性学の範疇での硬化則に対応するものである。これにより再現した凍結・融解時の体積変化挙動を図4に示す。

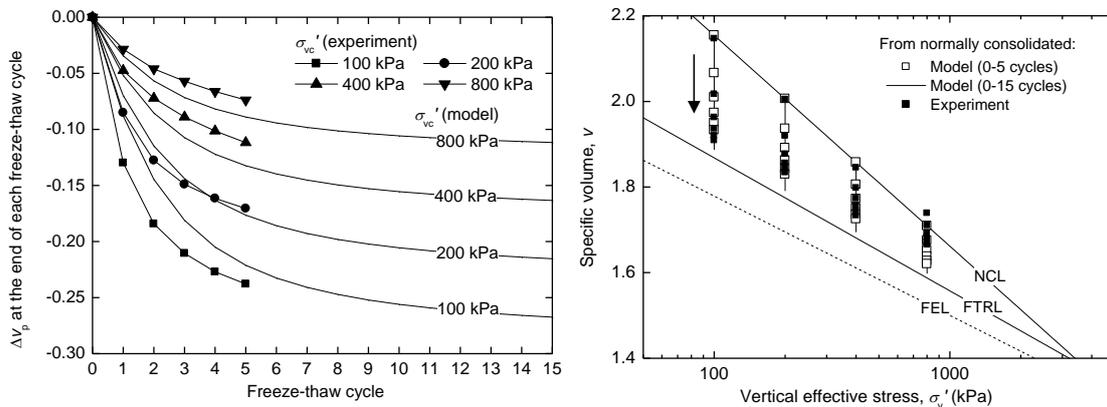


図4 提案するモデルによる凍結・融解時体積変化の再現 (ΔV_p : 塑性比体積変化)

上記の成果は、二編の論文原稿として現在ジャーナルに投稿中で、うち一編は修正を経て第二次査読まで進んでいる。なお末筆ながら、本研究への取り組みを通して、X線CTによる土質構造解析など、土の凍結・融解問題から離れて一般的に有用性の高い技術の発展にも寄与しており³⁾、それらの成果は別途公表している。

<引用文献>

- 1) 岡島 将太・西村 聡・肥後 陽介・木戸 隆之祐：粘土の繰返し凍結・融解時体積挙動とその可視化による解釈, 公益社団法人地盤工学会北海道支部技術報告集, Vol. 60, pp. 29-38, 2020.
- 2) 西村 聡：粘土の繰返し凍結・融解時体積挙動の要素モデル, 公益社団法人地盤工学会北海道支部技術報告集, Vol. 60, pp. 39-48, 2020.
- 3) Kido, R., Higo, Y., Takamura, F., Morishita, R., Khaddour, G. and Salager, S.: Morphological transitions for pore water and pore air during drying and wetting processes in partially saturated sand, Acta Geotechnica, published online (19 February 2020), <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00939-3>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kido, R., Higo, Y., Takamura, F., Morishita, R., Khaddour, G. and Salager, S.	4. 巻 -
2. 論文標題 Morphological transitions for pore water and pore air during drying and wetting processes in partially saturated sand	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Geotechnica	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） 10.1007/s11440-020-00939-3	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 Tokoro, T. and Ishikawa, T.	4. 巻 7
2. 論文標題 Measurement of unfrozen water in unsaturated soil with pulse NMR	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Geotechnical Society Special Publication	6. 最初と最後の頁 582-586
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3208/jgssp.v07.090	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 岡島将太・西村聡
2. 発表標題 粘性土の凍結・融解時の構造変化に関する実験的研究
3. 学会等名 地盤工学会北海道支部第59回技術報告会（苫小牧市）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡島将太・西村聡
2. 発表標題 要素としての粘性土の凍結融解挙動に関する実験的研究
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会（大宮市）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長井優樹・西村聡
2. 発表標題 三軸試験における均一な凍結粘性土試料の作製方法の検討
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会（大宮市）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陳可・西村聡・長井優樹
2. 発表標題 Elasto-viscoplastic modelling of the temperature- and time-dependent stress-strain behavior for frozen-unfrozen clays
3. 学会等名 第60回公益社団法人地盤工学会北海道支部技術報告会（札幌市）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡島将太・西村聡・肥後陽介・木戸隆之祐
2. 発表標題 粘土の繰返し凍結・融解時体積挙動とその可視化による解釈
3. 学会等名 第60回公益社団法人地盤工学会北海道支部技術報告会（札幌市）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村聡
2. 発表標題 粘土の繰返し凍結・融解時体積挙動の要素モデル
3. 学会等名 第60回公益社団法人地盤工学会北海道支部技術報告会（札幌市）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ke Chen, Satoshi Nishimura and Yuki Naga
2. 発表標題 An elasto-viscoplastic model for frozen-unfrozen clays for combined problems of temperature and load variations
3. 学会等名 8th Japan-China Geotechnical Symposium (京都市) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村 聡
2. 発表標題 粘土のメソスケール不均質性に基づく凍結・融解時体積変化モデル
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会 (京都市)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Nishimura, Shota Okajima, Jinyuan Wang, and Bhakta Raj Joshi
2. 発表標題 Small-strain deformation behaviour of a clay at frozen and unfrozen states: A comparative study
3. 学会等名 7th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (イギリス・グラスゴー) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tokoro, T. and Ishikawa, T.
2. 発表標題 Measurement for permeability of frozen soil by transient pulse method
3. 学会等名 4th International Symposium on Transportation Soil Engineering in Cold Regions (ロシア・サンクトペテルブルク)
4. 発表年 2019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	肥後 陽介 (Yosuke Higo) (10444449)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	
研究 分担者	所 哲也 (Tetsuya Tokoro) (40610457)	北海学園大学・工学部・准教授 (30107)	