

令和 4 年 5 月 6 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04626

研究課題名(和文) X線CT装置を用いた三次元土壌水分量計測手法の開発と応用

研究課題名(英文) Development and application of three-dimensional soil moisture measurement method using X-ray Computer Tomography

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：X線CTを用いた不飽和珪砂の体積含水率分布と水蒸発量の推定実験から、蒸発量について砂のCT値の平均値、輝度値の積算値から推定できる可能性があることが示された。

また飽和させた珪砂を冷凍庫で凍結させ、X線CTで撮影した凍結前、凍結後、融解後の試料の三次元画像に画像相関法を適用して凍結または融解に伴う体積ひずみの三次元分布を計算した結果、凍結・融解前後の土壌内の体積ひずみの鉛直および水平面分布が得られた。さらに珪砂を設置し底面から冷却させ、土壌内部の体積ひずみの計測を連続的に試みた結果、土壌内部の凍結が底面から上方へと進行するにつれて、体積ひずみも上方へ広がっていくことを確認することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

X線CTを用いた不飽和珪砂の体積含水率分布と水蒸発量の推定実験の結果より、水分センサーなどを用いた点計測ではなく、X線CTにより三次元的に土壌水分量を計測し、さらに蒸発量のような水分変化量の計測の可能性が示された。

また凍結土壌を用いた実験より、凍上現象のメカニズムを解明する上で、X線CTと三次元画像相関法を用いることで、凍結・融解に伴う移動量・体積ひずみなどの土壌の変形を示す物理量を連続的かつ三次元的に追跡できることを示した点に、学術的な意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Experiments using X-ray CT to estimate the volumetric water content distribution and water evaporation of unsaturated silica sand indicated the possibility of estimating the amount of evaporation from the CT value and the integrated brightness value of the sand. The three-dimensional distribution of volumetric strain due to freezing and thawing was calculated by Digital Volume Correlation to three-dimensional images of saturated silica sand before freezing, after freezing, and after thawing taken by X-ray CT. The time change of the distribution of volume strain in the soil was measured by the three-dimensional images of silica sand cooling from the bottom, and it was confirmed that as the freezing of the soil progressed from the bottom upward, the volume strain also expanded upward.

研究分野：水文学

キーワード：X線CT 土壌水分 凍上 DVC

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

土壌中における熱・水分移動量や土壌中の温度・水分量の予測のために種々の多孔媒体中の熱・水分移動数値解析モデルが提案され、現地における熱・水分観測結果との比較検証に基づいて、その妥当性の検証・モデル精度の向上が図られている。

そのようなモデル精度の向上のためには、現地での熱・水分特性を示す物理量、すなわち温度、水分量などを精度よくかつ可能な限り広範な領域において知ることが重要となる。しかしながら、土壌中の温度および水分量の計測は一般に、センサーを使用した点計測が主流であり、点計測においては多数のセンサーを要することとなり、効率的かつ高精度な計測の実施は難しい。

近年、非接触でコンクリート材料などの内部を観察する手法として、X線CT(コンピュータモグラフィ)が広く利用されている。X線CTは、内部の物質のX線吸収係数の空間分布を計測する装置である。X線吸収係数は、測定対象試料の物質の密度などにより決まる物性定数であり、この試料のX線吸収係数と水のそれから求めたCT値は、試料内部の密度を表現し得る物理量となる。従って、土壌を対象とした場合においても、水分の有無や大小によって土壌内部の密度分布が生じるため、CT値の違いを水分量の違いとして検出できる可能性がある。

研究代表者はこれまで、近畿大学理工学部コンクリート実験室に設置されているX線CT装置により種々の体積含水率の砂質土壌のCT値の頻度分布を求め、CT値の頻度分布の形状を表す特性値と体積含水率の関係を検討した。その結果、比較的大きい領域を対象とした場合、CT値の頻度分布の平均値、分散と体積含水率の関係には、何らかの相関がある可能性が示された。

しかしながら、より詳細な水分分布の計測のためには、さらに小さな領域のCT値の頻度分布と体積含水率の関係を求める必要があり、また両者の関係を用いて水の浸透過程などの測定により、その妥当性を検証する必要がある。さらに、凍上現象による土の移動と水分量の間接的な関係を知るために、凍上による土壌の移動量と水分量の測定が可能かどうかの検討も必要である。

### 2. 研究の目的

現状では室内実験レベルにおいても、3次元水分分布の計測手法は確立していない。本研究ではX線CT装置という非接触かつ比較的短時間に材料内部のX線吸収係数(CT値)を計測することにより、準リアルタイムでの計測を目指すことで、従来の研究とは異なる意義を有する。またこの研究の進展により、準リアルタイムでの3次元水分計測が可能となれば、液状水移動の際に生じるフィンガリング現象の土壌の凍上など3次元スケールでの現象の解析・解明に有効な手段となる。

### 3. 研究の方法

#### (1) X線CTによる珪砂の体積含水率鉛直分布および蒸発量の推定

8個の亚克力製リング(最上段および最下段のリングの高さ:20mm,他のリングの高さ:10mm)をテープで固定し、円筒型に組み上げ、カラムを作成する。作成したカラムに珪砂4号を詰め、飽和させる。一定期間乾燥させた後、試験体の透過画像を、X線CT装置を用いて撮影する。撮影終了後、カラムを分解し、炉乾燥法により砂の重量含水率を測定し、各リングの体積および砂と水の重量から体積含水率を求める。また、撮影した透過画像からCT値の頻度分布と輝度分布を、リングごとに作成する。

CT値は、測定対象物のX線吸収係数の値を水のそれを基準値として表したものであり、水のCT値は0、空気のCT値は-1000となる。頻度分布は、CT値または輝度値の頻度分布を示し、頻度は解析範囲内の各CT値に対するボクセル(CT画像を構成する微小な立方体)数を解析範囲内の全ボクセル数で除した値で示される。

頻度分布の平均値、分散、平均値の頻度および輝度値の積算値と体積含水率との関係を調べる。その近似式を用いて、体積含水率の推定実験を試みた。

体積含水率の推定実験では、高さ10mmのリングを6個使用し、カラムを作成する。前述と同様の手順を用いてリングごとにCT値および砂の輝度値の頻度分布から平均値、分散、平均値の頻度および輝度の積算値を求め、体積含水率の鉛直分布の推定を行う。X線CT装置による撮影は一日または二日間隔で複数回を行い、炉乾燥法によって求めた実際の体積含水率との比較を行う。また、推定した体積含水率から体積含水率分布と蒸発量の推定も行い、実際の蒸発量と比較する。

#### (2) X線CT装置による凍結・融解に伴う土壌内部の変形計測の検討

円筒型の亚克力製カラム(内径60mm,高さ110mm)内に飽和させた珪砂4号または珪砂5号を詰め、上端をラップで密封し側面を断熱材で覆う。次に、X線CT装置を用いてカラム内の土壌の再構成画像の撮影を行い、カラムを冷凍庫内に約24時間設置し、土壌を凍結させ、再構成画像の撮影を行った。その後、自然解凍により土壌を融解させて再構成画像を撮影した。

DVC(Digital Volume Correlation,三次元画像相関法、以下、DVCと称す)を凍結前、凍結後、融解後の三次元画像に適用し、土壌内部の体積ひずみの三次元分布を求めた。相互相関計測

では、相互相関を求める1領域を1辺24画素の立方体とし、図心間隔を12画素とした。DVCより得られた各図心位置の移動量ベクトルから、隣り合う図心位置での各方向の移動量の差を求め、図心間距離で除して各方向（水平方向：x軸およびy軸、鉛直方向：z軸）の軸ひずみを算出し、体積ひずみを算出した。

また凍結に伴う土壌の温度の変化調べるために、別途飽和した珪砂5号の土壌カラムを作成した。カラム内には所定の位置（図8参照）にT型熱電対が挿入されており、土壌を上述の方法で凍結させて、その間の温度の変化を1分毎に計測した。

(3) X線CTを用いた底面からの凍結の進行に伴う土壌変形過程の計測

内径65mm、高さ45mmの円筒形の亚克力製カラムに、図1に示すように、底面から高さ0mm, 13mm, 23mm, 33mm, 45mmの位置に温度計測用の熱電対を設置した。カラムに珪砂4号と水道水を詰め、表面に直径1mmのジルコニア球を約30粒撒いた。作成した珪砂試料を冷却台の上に設置し、発泡スチロールで作成した断熱カバーを上から被せる。そして、冷却台と恒温水槽を断熱したホースでつなぎ、冷却台内部にエタノールを-20℃まで低下させながら循環させ、各熱電対の温度を1分毎に計測した。

X線CT装置による透過画像の撮影については、土壌の凍結が開始した時点で1度目の撮影を行い、熱電対の温度が-1℃に達した時点で2度目の撮影を、熱電対の温度が-1℃に達した時点で3度目の撮影を、熱電対の温度が-1℃に達した時点で4度目の撮影を行う。

土壌の初期平均温度および体積含水率を変更しながら3回の実験を行い、それぞれの実験をCase A~Case Cとした。各ケースの実験条件については表1に示す。

撮影で得られた透過画像を用いてDVC解析を行い、各撮影時点での画像を比較し、土壌の鉛直方向（z軸）移動量および体積ひずみを求めた。

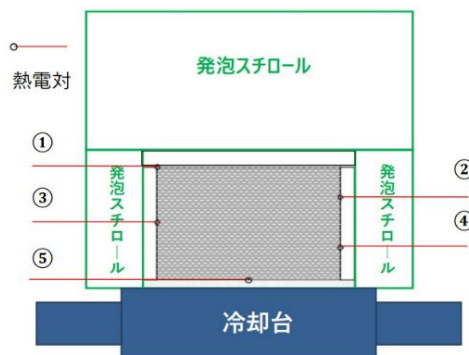


図1 カラムと冷却装置の概略図

表1 実験条件

	土壌初期平均温度	体積含水率
Case A	11.1	0.29
Case B	11.3	0.32
Case C	3.5	0.32

#### 4. 研究成果

##### (1) X線CTによる珪砂の体積含水率鉛直分布および蒸発量の推定

図2に、CT値の平均値と体積含水率の関係から推定した体積含水率の鉛直分布の経時変化を示す。時間の経過とともに体積含水率は減少しているが、最終日に炉乾燥法により計測した最上層と最下層は大きく異なり、中間層は近い値となった。

図3に、輝度値の積算値と体積含水率の関係から推定した体積含水率鉛直分布の経時変化と実測値を示す。CT値の平均値から得られた結果と同様、時間の経過とともに体積含水率が減少しているが、最下層の体積含水率は極端に大きく、また体積含水率が負になる場合もある。

図4に、推定した体積含水率から推定した蒸発量と実測値の経時変化を示す。実験開始から一日目の平均値から推定した蒸発量は実際の蒸発量とほぼ同じ値であることがわかる。その他は実際の蒸発量と大きく異なる。推定の蒸発量と実測値が合わない理由は、高含水率である一日目から三日目の体積含水率の推定値が高すぎるためと思われる。またCT値または輝度分布と体積含水率の関係の精度に問題がある可能性が考えられる。

以上より蒸発量について、CT値の平均値、輝度値の積算値から推定できる可能性はあるが、キャリブレーション実験および推定実験を行う際、供試体の重さの誤差を少なくし、締固めに留意する必要があると考えられる。

##### (2) X線CT装置による凍結・融解に伴う土壌内部の変形計測の検討

図5に、珪砂4号および5号の凍結前と比較した凍結後の体積ひずみの鉛直断面分布を示す。

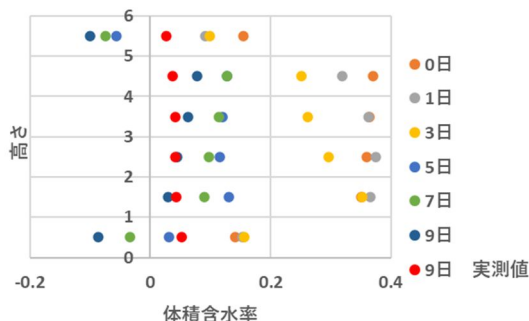


図2 CT値の平均値から推定した体積含水率と実測値との比較

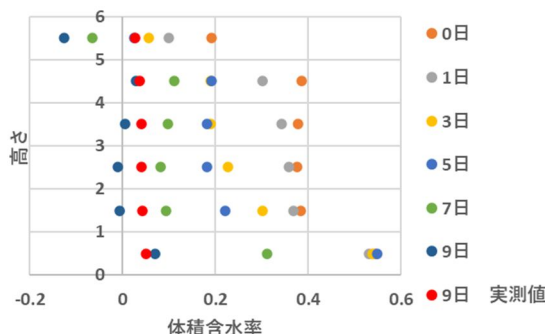


図3 輝度値の積算値から推定した体積含水率と実測値との比較

色が赤く正の値の領域は膨張を、色が青く負の値の領域は収縮を表す DVC 解析において対象領域の相互相関が低く、移動量ベクトルが算出できなかった部分は、黒く表示されている。

凍結後では、いずれの砂でも青い四角で囲った範囲で、比較的膨張が大きい凸型の領域が生じており、凍結に伴う土壌の膨張が確認された。比較的大きな膨張が観られる範囲は、珪砂 4 号で高さ約 64mm~91mm、珪砂 5 号で高さ約 47mm~91mm であった。特に粒径が小さい方の珪砂 5 号では、凸型の領域にかなり明瞭に 3 層程度の膨張が大きい層が観られる。一方、下方の土壌ではほとんどひずみが発生しておらず、土壌が凍結したにも関わらず間隙の膨張または収縮がほとんど生じていない。

図 6 に、珪砂 4 号および 5 号の凍結後と比較した融解後の体積ひずみの鉛直断面分布を示す。融解後は、凍結で膨張した部分が青い色を示しており、概ね凍結による膨張部分で、融解後に収縮が起こっている。

図 7 に、凍結前と比較した融解後の体積ひずみの鉛直断面分布を示す。珪砂 4 号では全域にわたりほぼ一様にわずかな残留膨張が計測されている。珪砂 5 号では、値は小さいものの明瞭な残留膨張が残っている。特に図-6 で凍結による膨張が明確に観られた部分には、3 層の層状の残留膨張の痕跡が残っている。

図 9 に、凍結過程における土壌温度の経時変化を示す（冷凍庫設置後 160~420 分）。以下が観察される（図 8 参照）。

- 1) 土壌温度はどの地点でもほぼ同時に 0 付近に達する。
- 2) 約 250 分で、土壌の上から 22mm の 3 地点（ $\Delta$ 、 $\square$ 、および  $\circ$ ）が最初に氷点下に達する（図中矢印 A の時点）。
- 3) 次に土壌の下から 30mm の 3 地点が氷点下に達する。約 320 分（矢印 B）に側面の  $\square$  が、約 360 分（矢印 C）に中央の  $\Delta$  と  $\circ$  がほぼ同時に氷点下に達する。
- 4) さらに少し遅れて土壌中央部の 3 地点で  $\square$ 、 $\Delta$ 、 $\circ$  の順で氷点下に達する。は側面から 10mm、は側面から 20mm の距離にあり、は断面中央にあり、両側面から 30mm の距離にある。

以上、凍結の順序と上下面（断熱なし）および側面からの距離の関係は厳密に対応している。

上記の膨張・収縮に関する観察結果と、温度計測の結果を合わせて考えると、土壌の凍結・融解過程について以下のシナリオが考えられる。

- 1) 表面と底面から凍結が始まる。表面側の凍結が先行する。この段階では氷膜は完結しておらず、氷の体積膨張で押し出された水は上方への逃げ道があるので、図 5 で表層に近い層には顕著な膨張は見られない。
- 2) 表面が隙間なく氷結し、水の上層への移動が妨げられる。従って氷結が完全に進んだ表層の下では、水の逃げ場がなく、氷の膨張による間隙の広がりが起こる。
- 3) 側面の氷結も進み、側面の凍った水と土壌の上下方向の移動が拘束される。中央部に向かう水の水平移動は起こっている。上下と側面の氷で囲まれた内部の水は移動できないので、氷結と

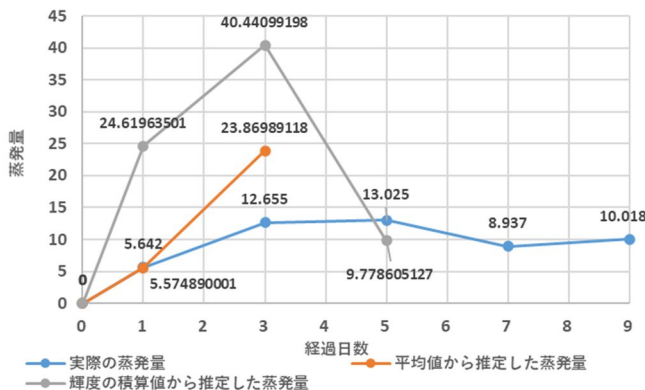


図 4 蒸発量の実測値と推定値の経時変化

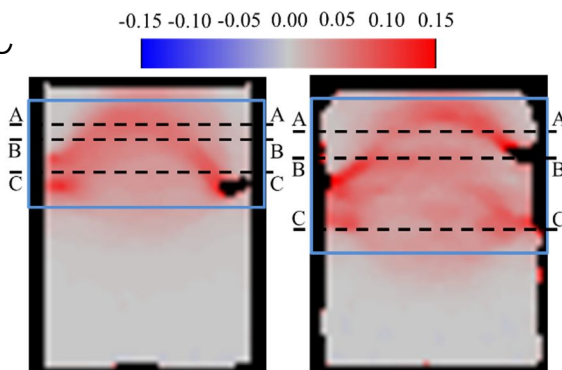


図 5 凍結後の体積ひずみの鉛直断面分布（左：珪砂 4 号、右：珪砂 5 号）

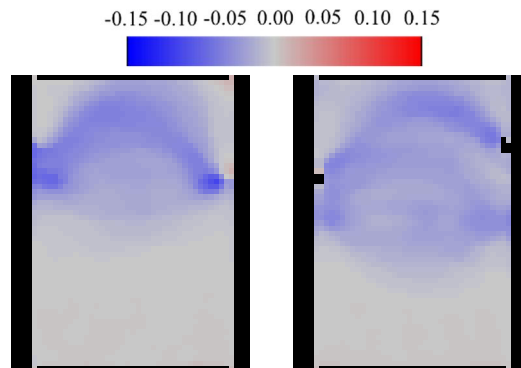


図 6 融解後の体積ひずみの鉛直断面分布（左：珪砂 4 号、右：珪砂 5 号）

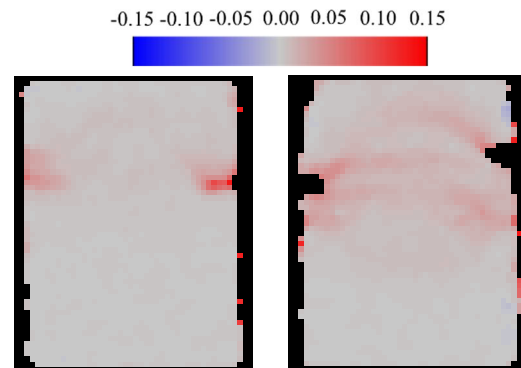


図 7（凍結前と比較した）融解後の体積ひずみの鉛直断面分布（左：珪砂 4 号、右：珪砂 5 号）

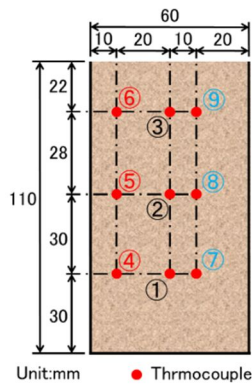


図 8 熱電対配置図

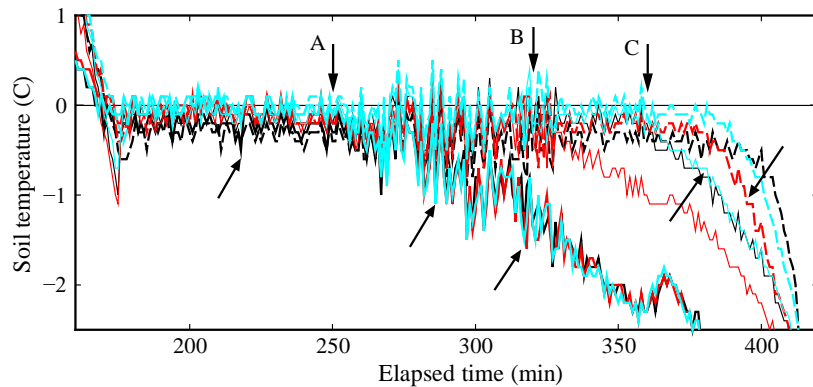
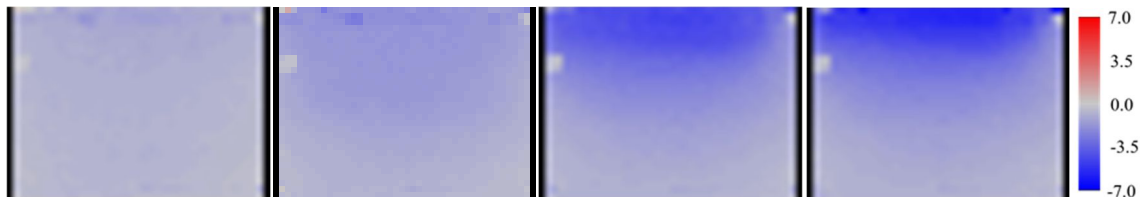
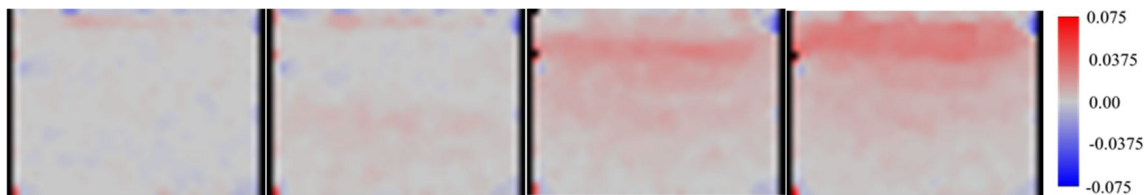


図 9 土壌温度の経時変化 (珪砂 5 号)



(a)撮影 1 時点 (b)撮影 2 時点 (c)撮影 3 時点 (d)撮影 4 時点

図 10 Case C における鉛直断面の移動量分布の経時変化 (単位 : pixel)



(a)撮影 1 時点 (b)撮影 2 時点 (c)撮影 3 時点 (d)撮影 4 時点

図 11 Case C における鉛直断面の体積ひずみ分布の経時変化

ともに内部の間隙を広げる．全体としても上下方向に伸びる．上面は氷で下面は氷とアクリルであるので，上面の拘束が弱い．従って側面に強い拘束を持つ，卵型の膨張領域が形成される．

このシナリオを踏まえると，温度計測結果も X 線 CT と DVC による膨張領域の形状の計測結果と整合性がある．

以上より，X 線 CT 計測は土壌の凍結・融解過程の究明に極めて有望な実験手段であることがわかった．

### (3) X 線 CT を用いた底面からの凍結の進行に伴う土壌変形過程の計測

図 10 に，Case C における，凍結開始前と各撮影時点を比較したカラム中心断面における鉛直方向の移動量の経時変化を示す．色が赤く正の値の領域は下方向への移動を，色が青く負の値の領域は上方向への移動を示している．撮影 1 時点で，わずかであるが土壌全体で土壌底部の凍結による上方への移動を確認することができ，撮影 2 時点では土壌の上半分の範囲でより大きな移動が生じる．撮影 3 と撮影 4 時点では，さらに大きく上方に移動することが確認された．

図 11 に，Case C における，凍結開始前と各撮影時点を比較したカラム中心断面における体積ひずみの鉛直分布の経時変化を示す．色が赤く正の値の領域は膨張を，色が青く負の値の領域は収縮を示している．撮影 1 の時点では体積ひずみはほとんど確認できないが，撮影 2 時点で底面から高さ約 14.8mm ~ 22.1mm の範囲で僅かに膨張が確認できる．撮影 3 時点では底面から高さ約 32.5mm ~ 38.4mm の範囲で大きな膨張が生じ始め，撮影 4 時点ではさらに表面付近まで膨張が広がっていることが分かる．なおすべての実験ケースにおいて，移動量と体積ひずみの分布の経時変化は，同様の傾向を示した．

また DVC 解析によって得られた土壌表面の鉛直方向の移動量の平均値と，土壌表面に撒いたジルコニア球の重心位置の鉛直方向の移動量の平均値を比較すると，いずれのケースでも各時点で両者の値は概ね一致しており，その差は最大で 0.05mm 程度であったことから，DVC による計測の妥当性が確認できた．

これらの結果から，凍結の進行に伴う土壌内部の体積ひずみの発生過程を計測することができ，土壌内部の凍結が底面から上方へと進行するにつれて，体積ひずみも上方へ広がっていくことを確認することができた．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 TAKANO Yasuhide, FUMOTO Takayuki, KAWAI Katsuyuki	4. 巻 77
2. 論文標題 DETECTION OF SILICA SAND LAYER DEFORMATION DUE TO FREEZING AND THAWING USING X-RAY COMPUTER TOMOGRAPHY IMAGES	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_1357 ~ I_1362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2.I_1357	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高野保英, 麓隆行, 相澤春太郎, 恩田隆太郎
2. 発表標題 X線CT装置を用いた凍結・融解に伴う土壌内部の変形計測
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森川純至, 張天叡, 高野保英, 麓隆行
2. 発表標題 X線CTによる底面からの凍結の進行に伴う土壌内部の変形過程の計測
3. 学会等名 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2022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	麓 隆行 (Fumoto Takayuki)  (30315981)	近畿大学・理工学部・教授  (34419)	

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	河井 克之  (Kawai Katsuyuki)  (30304132)	近畿大学・理工学部・教授    (34419)	

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