

平成 30 年 5 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14304

研究課題名(和文)多孔質媒体での熱水 NAPL 空気四相流の可視化とモデル化に向けた試行的研究

研究課題名(英文) Experimental study on visualising and modelling heat-water-NAPL-air multiphase flow in porous media

研究代表者

高井 敦史 (Takai, Atsushi)

京都大学・地球環境学堂・助教

研究者番号：30598347

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、(1)熱水 NAPL 空気混相流の地盤内で動態の可視化、(2)熱作用を受けた地盤の物理化学的变化の評価、に取り組んだ。上記(1)に関しては、鉛直一次元カラム試験により、赤外線カメラを組み込んだ画像解析手法の適用性を確認し、繰返し給排水が4サイクル目まではNAPLが間隙にトラップされ残留飽和度が漸次的に変化すること、地盤の熱応答は加熱温度より加熱時間の影響を受けること等を明らかにした。(2)に関しては、熱伝導に伴う粘土地盤の変形挙動を要素試験と土槽試験により評価し、地盤温度が高くなるほど圧密係数が大きくなること、保水性に富む粘土材料ほど温度効果が大きくなること等を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, 1) visualising heat-water-NAPL-air multiphase flow in porous media and 2) clarifying temperature effects on physical and chemical properties of the ground were done. First, we have clarified the applicability of an image analysis method incorporated with an infrared camera using a vertically one-dimensional column. By using this method, we found that residual saturation degrees of water and LNAPL can be almost stable after 4th cycle of drainage and imbibition in a soil column and that reponse of ground temperature is more dependent on heating time than on heating temperature. Second, deformation of clay ground subjected to elevated temperatures was evaluated by an element-scale test and a large-scale tank test. Experimental results demonstrate that response of ground temperature is more dependent on heating period than on heating temperature. It was also clarified that the temperature effects on deformation is more significant with clay having higher water retentivity.

研究分野：地盤環境工学

キーワード：伝熱 非水溶性液体 (NAPL) 画像解析 圧密 混相流 地盤改良 環境地盤工学 エネルギー地盤工学

1. 研究開始当初の背景

停滞する廃棄物処分場跡地や土壤汚染地の利活用を加速化させる手段の1つとして、地盤汚染サイトにおける余剰熱の利用が挙げられる。熱エネルギーを土壤汚染地で利用することで、汚染物質の揮発性/溶解度の向上や微生物の活性化に伴う汚染物質回収効率の向上、貯留熱利用による上部構造物の省エネルギー化、工業廃熱等の余剰熱の回収による気温上昇抑制、等の環境面も含めた種々の効果と技術の高度化が期待でき、いわゆるブラウンフィールド問題の解決にも貢献しうる。また、低濃度汚染土の主な活用用途として想定される盛土構造物では、深層地盤に比べ地盤温度の日変動や季節変動が相対的に大きく無視できない。このように地盤汚染サイトでの温度変化を取り扱う場合、熱作用がもたらす種々の要因を考慮し、環境安全性を議論しなければならない。特に、地盤内の熱伝導については近年研究事例が増えつつあるものの、間隙水と非水溶性物質 (NAPL) の挙動評価に熱の影響を考慮した事例は世界的にもない。熱利用技術の合理的な設計と土地資源の活用のためには、地盤物性の熱応答や自然対流等を考慮し、熱水 NAPL 空気混相流を定量的に把握する必要がある。

2. 研究の目的

帯水層に熱エネルギーを注入する場合、温められた間隙水は浮力により上昇傾向を示す。一方で、加温を受けた箇所の飽和度は経時的に低下することから、キャピラリー効果による水平方向の水分移動と、間隙水の下向き重力流が生じることから、地盤温度変化に伴う熱と間隙水の動態は極めて複雑である。これらの背景を受け、本研究では、(1) 熱水 NAPL 空気混相流の地盤内で動態の可視化、(2) 熱作用を受けた地盤の物理化学的变化の評価、に取り組む。上記(1)に関しては、鉛直一次元土槽試験により、各相の動態をデジタルカメラと赤外線カメラで固定観測するとともに、画像解析により地盤物性の熱応答を定量化する。さらに土槽背面に組み込んだ各種センサーの指示値と比較し、画像解析手法の妥当性と既存モデルの適用性を明らかにする。(2)に関しては、初めに熱水 空気三相流と水 NAPL 空気三相流に関して実験を行い、各相の経時変化を定量的に評価した上で、それらを統合して四相問題へと発展させる。

3. 研究の方法

本研究では、(1) 鉛直カラムを用いた画像解析による混相流の可視化、(2) 熱作用を受けた地盤の物理化学的变化の評価、を行った。

3.1 鉛直カラム試験による混相流の可視化

鉛直カラムを用い、地盤内での動態評価のための計測技術の確立と、一次元場での混相流の可視化を行った。試験装置は図1に示す

とおりで、プレート型ヒーターをカラム底部あるいは上部に設置し、鉛直方向の砂地盤の伝熱特性を評価した。側面からの熱拡散を極力防ぐため、内寸高さ 550 mm × 幅 70 mm × 奥行 70 mm のアクリル製(前面は赤外線透過樹脂を使用)カラムを作製し、グラスウールで断熱加工した。水 NAPL 空気三相流の動態を、D7000 (Nikon) を用いた画像解析により評価するとともに、温度変化は CPA-E40A (FLIR) を用いた画像解析と熱電対による物理的計測を併用することで、画像解析手法の妥当性を検証した。これらの計測機器は、図2に示すように照度一定の室内に固定し、定点計測した。図3のように取得した熱画像は MatLab を用いて数値化し、カラム内の温度分布を定量化した。カラム前面の赤外線透過樹脂による減衰を考慮するため、キャリブレーションを行い、減衰率をほぼ線形近似できることを事前に確認した。



図1 動態観測に用いたカラム試験装置

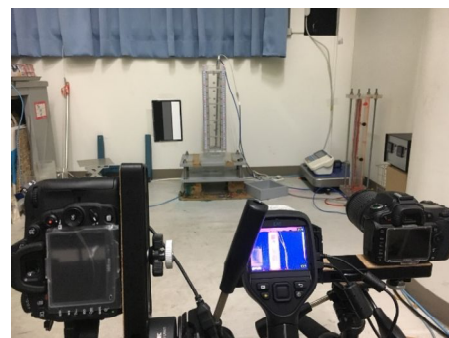


図2 計測装置の配置

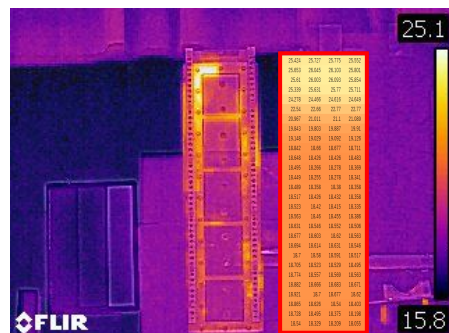


図3 熱画像カメラによる動態観測例

砂試料には、乾燥および飽和させた豊浦砂を用いた。供試体を飽和させる際には脱気水を用い、試料に乱れが生じないよう定流量が

ンプをカラム底部に接続し行った。水 NAPL 空気三相流の評価においては、着色したブリリアントブルーFCFで着色した蒸留水と、スタン III で着色したパラフィンを用い、 $\lambda = 450 \text{ nm}$ と 640 nm の異なる透過波長を有するバンドパスフィルターを取り付けて画像解析することで、各波長の光学密度の違いから飽和度を求めた。豊浦砂は、間隙率が 0.4 となるよう 5.0 cm ごとに乾燥砂を突き固めて作製し、カラム背面に 5.0 cm 間隔で設置した 9 本の熱電対により、各位置での温度を 2 秒ごとに 24 時間連続計測した。熱源温度は 40°C と 70°C の 2 条件とし、飽和度が 0% あるいは 100% の試料に対し、熱源をカラム底部に設置し上方に加熱する場合と、熱源をカラム上端に設置し下方に加熱する場合の 2 条件で実験を行った。

3.2 熱作用を受けた地盤の物理化学的性質の変化

温度効果を受けた粘土の圧密特性を段階的圧密試験により要素的に評価するとともに、圧密パラメータへの影響要因を検討した。さらに、直径 80 cm の大型土槽を用いた圧密試験を行い、熱源からの伝熱とそれに伴う粘土地盤の変形挙動を評価した。

試料には、市販のカオリン粘土 (ASP200, BASF 社製) と笠岡粘土 (立花マテリアル製) を使用した。各試料の基礎物性は表 1 に示すとおりであり、コンシステンシーや活性度が異なるため使用した。

要素試験は、温度一定の条件下で、JIS A 1217:2009 に準拠した段階的圧密試験を行った。液性限界の 1.1 倍になるよう各粘土試料の含水比を調整した後、直径 10 cm、高さ 5 cm の円筒型セルに充填し、側方からハンマーで軽く打撃を与えて密実度を高めた。カオリン粘土と笠岡粘土の充填後の湿潤密度はそれぞれ 1.43 g/cm^3 、 1.54 g/cm^3 で、飽和度は 95% 以上である。ペロフラムシリンダーを用いて載荷し、装置を浸漬した浴槽内の水温を調整することで試料温度を制御した。圧密圧力は荷重増加率 2 で $4.9 \sim 628 \text{ kPa}$ とし、 23°C 、 35°C 、 50°C 、 65°C で試験を行った。

図 4 に土槽試験に用いた装置の概要図を示す。試料中央に立て込んだシースヒーターにより供試体を放射状に加熱できる。載荷板の中央には直径 5.0 cm の直孔が設けてあり、沈下が進行してもシースヒーターは影響を受けない芯鞘構造である。スクリュージャッキによる一般的な平面載荷に加え、載荷板と下部のゴム膜との間に空気圧を与えることで、地盤の三次元的な変形に追従しつつ載荷圧を一定に保てる構造となっている。粘土層下端から 10 cm の高さで、ヒーター表面から 10 cm 間隔でボタン式温度ロガーと間隙水圧計を 3 つずつ設置し、載荷板に取り付けたレーザー変位計と巻き込み式変位計で各計測点での沈下量を計測した。加熱温度は、ヒーター表面に取り付けた熱電対で制御した。土槽

外周部の断熱は行っていない。土槽試験に用いた供試体は直径 80 cm であり、層厚 20 cm の粘土層の上下に排水用の砂層 10 cm を設けた。試料には要素圧密試験と同じカオリン粘土を用いた。珪砂 6 号を用いて水締めで排水用の飽和砂層を層厚 10 cm で作製した後、 $w = 90\%$ に含水比調整したカオリン粘土を層厚 20 cm で作製し、その上部に飽和砂層を層厚 10 cm で作製した。各層境界には不織布を設置し、目詰まりによる排水機能の低下を抑止した。カオリン粘土は含水比調整後に減圧脱気を行い、飽和度を高めてから充填した。試験は、加温せず 23°C の室温で圧密を行うケースと、ヒーター温度 50°C で 24 時間供試体を加温してから圧密を行うケースの 2 通りで実施した。初めに、約 2.2 kPa に相当する載荷板の自重で 48 時間予備圧密を行い、その後荷重増分が 20 kPa、40 kPa、80 kPa となるよう圧密圧力を与えた。各段階で 48 時間載荷を継続した。加熱を伴ったケースの最終段階 (80 kPa) のみ空気圧載荷により圧密を行ったが、その他はスクリュージャッキによる平面載荷で圧密した。

表 1 使用材料の基礎物性

	カオリン	笠岡粘土
土粒子密度 (g/cm^3)	2.58	2.68
塑性限界 (%)	30.2	24.6
液性限界 (%)	77.0	58.5
塑性指数	46.8	33.9
2 μm 以下含有率 (%)	92	43
活性度	0.50	0.78

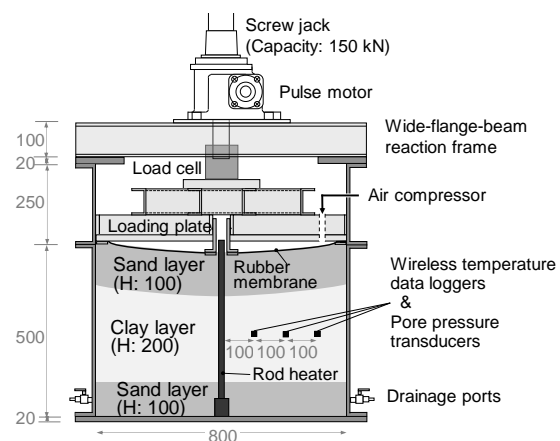


図 4 土槽試験の装置概要

4. 研究成果

4.1 鉛直カラム試験による混相流の可視化

図 5 と図 6 に、画像解析手法により求めた水と NAPL の飽和度の水位変動に対する変化をそれぞれ示す。図 5 から、初期の給排水サイクル時とそれ以降のサイクルでは飽和度分布が異なることが明らかであり、LNAPL の移動性を評価する上で地下水変動の影響が重要であることを示唆している。また図 6 に示すように、水より軽い LNAPL のブルームは、水位の低下に伴い下方に移動するもの

の、水位の回復時に相当量がトラップされている。同様の傾向が、テンシオメーターによる物理計測でも得られており、画像解析の妥当性が示されたと言える。

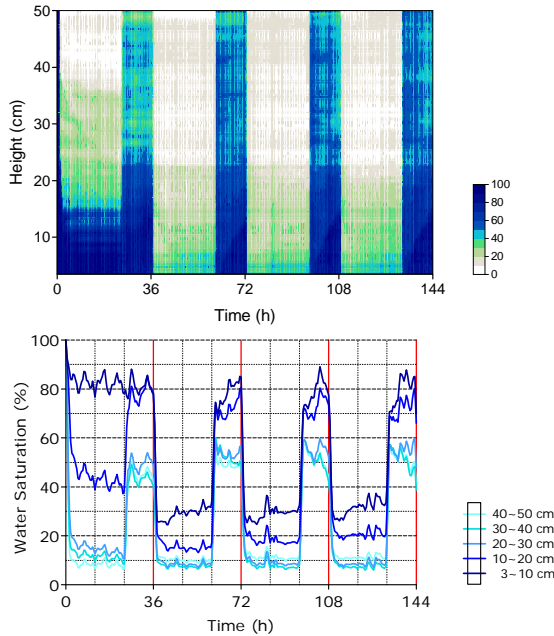


図5 カラム試験中の水の飽和度分布の推移と各高さにおける変化

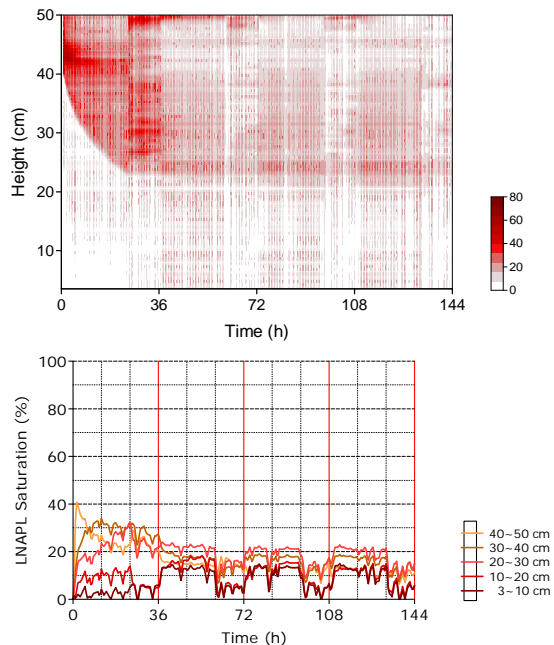


図6 カラム試験中の LNAPL の飽和度分布の推移と各高さにおける変化

図7に、乾燥砂を底部から70℃で加熱したときの各高さでの温度の経時変化を示す。いずれの実験ケースにおいても、実験開始後に熱源からの距離に近いものから順に温度が上昇し、熱源近傍の計測位置では約8時間後に一定の温度へと漸近した。ここで、以下の式(1)で表される相対温度上昇率 T_r を定義し、加温に対する地盤の応答を評価した。

$$T_r = \frac{T - T_0}{T_H - T_0} \times 100 \quad (1)$$

T_H は熱源温度(°C)、 T_0 は初期温度(°C)、 T は計測温度(°C)である。

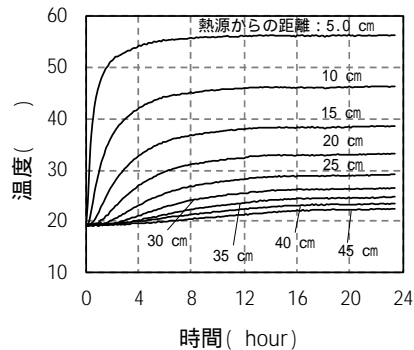


図7 カラム内温度の経時変化 (底部熱源70 飽和砂)

・加熱温度の影響

飽和砂を底部より加熱したケースの、3時間後と24時間後の各位置での相対温度上昇率は図8に示すとおりであり、相対温度上昇率は加熱温度よりも加熱時間に依存する傾向を見せた。また熱源付近では70での加熱時の値が40のときを上回っているが、カラム中央部付近から計測位置が遠くなるほど逆の関係を示した。これは、熱源付近では熱源温度が高いほど熱流束が増大したこと起因すると考えられるが、カラム中央部付近より遠い領域では、温度上昇に伴って土粒子の熱伝導率が減少し、土粒子と水の比熱が増大したこと起因すると推察される。

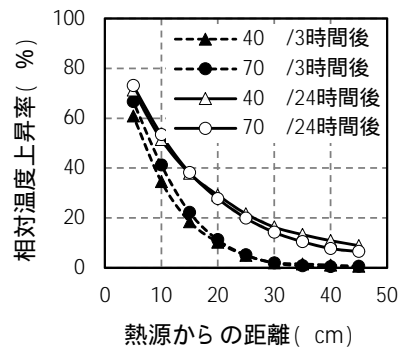


図8 加熱温度による影響

・加熱方向の影響

図9に示すとおり、上方から加熱した場合に比べ、下方からの加熱時の方が伝熱が促進される結果を示した。これは鉛直下方からの加熱時には対流が発生したこと起因すると考えられる。加熱された間隙水が、密度差の増加に伴い生じた浮力により上昇し、伝熱が促進されたと推察される。

・飽和度の影響

いずれの実験ケースにおいても、乾燥砂よりも飽和砂を用いたケースの方が伝熱が促進された。図10に乾燥砂と飽和砂を鉛直下方より70で加熱したケースの、定常状態での相対温度上昇率を示す。熱源近傍の計測

位置の相対温度上昇率は、乾燥砂では 47.3%、飽和砂では 73.1%と大きな差が見られた。これは含水率の増大に伴って熱伝導率が増大したことに起因すると考えられる。一般的に含水比が高まると比熱の大きな水の割合が増え、伝熱の抑制の効果がみられるが、豊浦砂を用いた今回の実験ではその効果を熱伝導率増大の効果が上回ったと推察される。

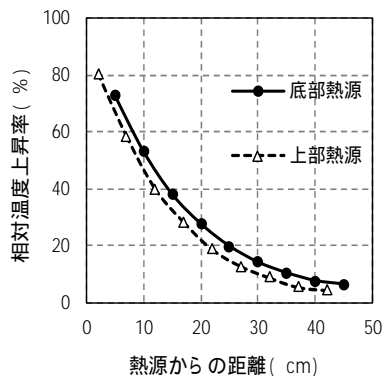


図9 加熱方向の影響

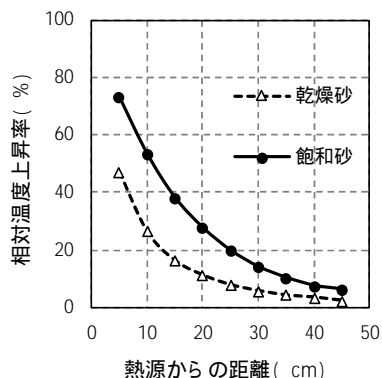


図10 試料の飽和度の影響

4.2 熱作用を受けた地盤の物理化学的性質の変化

図 11 に要素試験で得られた各試料の e - $\log p$ 曲線を示す。縦軸には、初期間隙比で一般化した値 e/e_0 を用いている。カオリン粘土では、特に圧密圧力が 78.5 kPa 以上の範囲で e - $\log p$ 曲線が下方にシフトしており温度の影響が顕著であった。 $p = 628$ kPa の時に $\Delta e = 1.27$ で温度の影響が最も大きかった。一方、笠岡粘土では載荷圧に関わらず温度が沈下量に与える影響は相対的に小さいことが分かる。非排水加熱で発生する過剰間隙水圧と塑性指数に相関があることが報告されており、塑性指数の小さい笠岡粘土では温度効果が小さかったと考えられる。

図 12 に圧密係数 (C_v) と供試体温度の関係を示す。ここでは 23 °C のケースに対する C_v の比で表しており、全載荷段階の平均値を用いている。横軸には 23 °C からの増分で示している。この図から分かるとおり、いずれの試料でも供試体温度が高くなるほど C_v は大きくなり、40 °C 程度温度が上昇すると C_v は約 2 倍となった。ここで、 $\log C_v$ と供試体温度の関係が以下の式(2)で線形近似できる

と仮定し、最小二乗法により圧密係数の温度変化による増加率を求めた。

$$\log C_v = a \cdot T + b \quad (2)$$

ここで、 C_v : 圧密係数 (cm^2/day)、 T : 供試体温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 a : 圧密係数増加率、 b : Y 切片である。既往研究の結果も併せ、圧密係数増加率と液性限界の関係を図 13 に示す。凡例中の数値は用いた供試体の直径 (D) と初期高さ (H) である。 D/H が 1 以上の 4 点では液性限界と圧密係数増加率に相関が見られ、液性限界が大きく保水性が高いほど温度が C_v に与える影響が相対的に小さいことが分かる。これは拡散二重層が温度とともに厚くなることも一因と考えられるが、サイズ効果も含めて今後精査する必要がある。

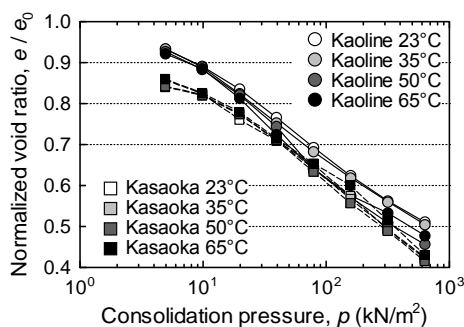


図11 要素試験で得られた e - $\log p$ 曲線

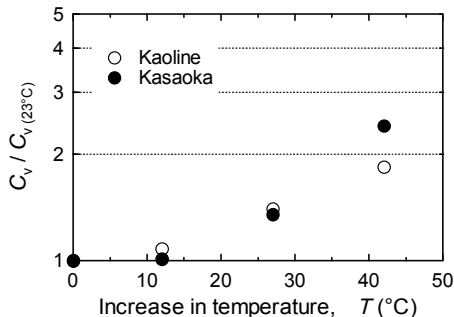


図12 圧密係数と温度の関係

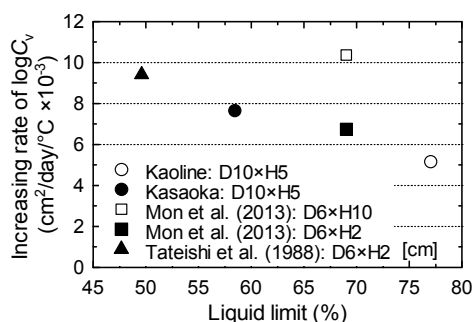


図13 圧密係数増加率と液性限界の関係

図 14 に土槽試験の最終荷重段階 (40 kPa 80 kPa) の結果を、ヒーター表面からの距離の関係で示す。この結果から分かるように、20 °C のケースに比べ加温時の地盤温度は全体的に高く、ヒーターから離れるほど低い。沈下量はヒーター周辺ほど大きくすり鉢状に沈下していたことが分かる。温度が高い

地点ほど沈下量が大きい傾向は要素試験の結果とも整合するが、ヒーターから 10 cm の地点での最終の間隙比は 1.35 で、要素試験から得られた 1.62 より小さかった。これは、土槽試験では上下の砂層を非圧縮と見なしており、粘土層の沈下量を過大評価したためである。

C_v はいずれの地点でも約 280 cm^2/day であり、温度との相関は見られなかった。要素試験では温度と C_v に一意的な相関が見られたが、土槽試験では地盤温度の増分が小さく、明確な差異として現れなかったと考えられる。一方で、20 $^{\circ}\text{C}$ のケースと比べると大きい値を示しており、温度上昇が圧密速度の向上に寄与することが示唆された。

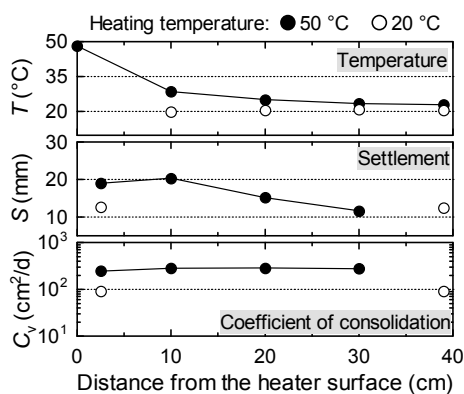


図5 土槽試験の結果 ($p = 80 \text{ kPa}$)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- 1) Takai, A., Akama, T., Inui, T., Katsumi, T. and Ogawa, A. (2018): Laboratory tests on thermal improvement of soft clay under elevated temperatures, International Symposium on Energy Geotechnics (accepted). 【査読有】
- 2) Ghaaowd, I., Takai, A., Katsumi, T., and McCartney, J.S. (2017): Pore water pressure prediction for undrained heating of soils, *Environmental Geotechnics*, 4(EG2), ICE, pp.70-78. doi:10.1680/jenge.15.00041. 【査読有】
- 3) Flores, G., Yamanaka, Y., Katsumi, T. and Inui, T. (2017): Effects of cyclic water table fluctuation on a water/LNAPL/air three-phase system in subsoil, *Proceedings of the 2nd Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics*, Paper ID 32. 【査読有】
- 4) Takai, A., Ghaaowd, I., McCartney, J.S. and Katsumi, T. (2016): Impact of drainage conditions on thermal volume change of soft clay, *Geo-Chicago 2016: Geotechnics for Sustainable Energy*, GSP No.270, ASCE, pp.32-41, doi: 10.1061/9780784480137.004 【査読有】
- 5) Flores, G., Katsumi, T., Eua-Apiwatch, S., Lautua, S. and Inui, T. (2016): Migration of

different LNAPLs in subsurface under groundwater fluctuating conditions by the simplified image analysis method, *Journal of Geo-Engineering Sciences*, 3(1), pp.15-30.

【査読有】

〔学会発表〕(計10件)

- 1) 高井敦史 (2018): 加温条件下での粘土の圧密挙動に関する実験的検討, 第53回地盤工学研究発表会
- 2) Matsuda, Y. (2018): Variability of S-p relation of water and LNAPL under repeated drainage and imbibition, Geo-Environmental Engineering 2018.
- 3) Matsuda, Y. (2018): Variability of S-p relation of LNAPL and water under repeated drainage and imbibition, 第53回地盤工学研究発表会
- 4) Yamanaka, Y. (2017): Study of LNAPL migration subjected to cyclic groundwater fluctuation, Geo-Environmental Engineering 2017
- 5) 清水巧巳 (2017): 砂質土の伝熱異方性に関する実験的検討: 加熱温度と飽和度の影響, 第52回地盤工学研究発表会

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高井敦史 (TAKAI, Atsushi)
 京都大学・地球環境学堂・助教
 研究者番号: 30598347

(2) 研究分担者

FLORES, Giancarlo
 京都大学・工学研究科・准教授
 研究者番号: 80598996

勝見 武 (KATSUMI, Takeshi)
 京都大学・地球環境学堂・教授
 研究者番号: 60233764

乾 徹 (INUI, Toru)
 京都大学・地球環境学堂・准教授
 研究者番号: 90324706