

令和元年6月12日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26249068

研究課題名(和文) 微細間隙構造と地下水流れを考慮した堆積岩の凍結挙動の定量的な評価手法の開発

研究課題名(英文) Heat transfer phenomena and its suitable boundary conditions of geomaterials under cooling and heating process

研究代表者

山辺 正 (Yamabe, Tadashi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40125894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 23,600,000円

研究成果の概要(和文)：低温環境に置かれた岩質材料の伝熱特性について検討した。供試体レベルの冷却試験では直径50 mm高さ50 mmの円柱供試体と、直径50 mmおよび100 mmの球状供試体を用いた。実験では中心と側面において時間経過に伴う温度変化を計測した。解析では円柱および球状供試体の冷却試験に厳密解を適用し、熱伝達境界を適切に設定することにより伝熱特性を精度良く表現できた。さらに数値解析においても0付近で温度低下が停留する状況を再現することが出来た。また、凍結管周辺の流れ挙動を室内実験により検討し、凍結領域が進展する様子を可視化することに成功した。これらの成果を実地盤に適用することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地盤内の非定常な凍結融解現象を正確に表現するためには、現象の支配方程式を解く上で必要となる境界条件の選択が非常に重要である。本研究では実験室内で岩石供試体を用いて凍結融解試験を実施し、岩石中心部分の非定常な温度変化を表現するためには境界条件として熱伝達境界が最適であることを確認した。この結果は供試体レベルのみならず、凍結融解状態に普遍的に適用できるものである。さらに、凍結融解現象の数値解析を実施することにより、流れ場に置かれた凍結管周りの現象を表現できる事も確認できた。

研究成果の概要(英文)：To investigate the heat transfer characteristics of sand stone due to cooling and heating process, cylinder of 50mm diameter and sphere of 50mm and 100mm diameter were used as the samples. Two types of boundary conditions had been used for the derivation of exact solutions of the governing equations. They were Dirichlet boundary (DB) and heat transfer boundary (HTB) conditions. Hence, comparison had been made on these two boundary conditions to identify their suitability on heat transfer characteristics. The results show that the exact solutions derived using HTB has been fitted better than DB for both cooling and heating phenomenon in cylinders as well as in spheres.

研究分野：岩盤力学

キーワード：凍結融解

## 1 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の汚染地下水対策として採用された凍結工法であるが、従来は一時的な対策として補助工法に採用されてきたため、長期安定性について検討する必要があると考え課題として 1) 堆積岩の物性、特に微細構造とその異方性の凍結への影響、2) 凍結場を伴う地下水流動の影響、3) 砂岩・泥岩境界など物性の異なる境界の影響、4) 堆積岩中の割れ目の影響を取り上げ、これらについて検討する事が研究開始当初の背景であった。

## 2 研究の目的

地盤が低温環境に置かれた場合、内部に含まれる水分の凍結による様々な影響は、水の相変化 [1] が原因である。この問題を解析的に扱った研究にはステファン問題 [2],[3] の取組み [4] があり、また水分が凍結する連成場において凍結時の熱伝達係数について検討した例 [5], [6] や、原位置の凍結融解に関する研究 [7] もある。これらの現象を数値解析 [8],[9] に含めるには、境界条件が単純な室内実験において解析手法の確認や実験手法の妥当性を検討すべき [10] である。

本報告では、飽和供試体の凍結融解試験に伴う温度変化挙動を紹介した後、乾燥供試体を用いた冷却放熱試験について検討した。その結果から、供試体中心の温度変化を表現できる境界条件の形式について厳密解を援用した考察を展開する。最後に、飽和供試体における潜熱の効果を取り入れた数値解析結果について述べ、凍結管周辺に流れ場を伴う場合について文献を紹介する。

## 3 研究の方法

研究背景のうち、1) については要素特性を把握するための実験装置を作成し数値解析のための入力情報を得る。2) については室内において熱・浸透連成実験を実施すると同時に熱・浸透連成解析コードを新たに作成し、凍結領域周辺に流れ場が存在する場合について、定量的に評価する。関連して凍結領域周辺の熱境界としては熱伝達境界が最適である事を示し、厳密解の援用を得て熱伝達係数を合理的に決定する手法を見出す。3) については 1) および 2) に関連し凝灰岩、泥岩、砂岩など多種類の供試体による低温下の特性評価を実施する。4) については、今後とも継続して研究を進めることが必要である事が判った。

## 4 研究成果

### 4.1 円柱供試体の温度変化と乾燥状態の厳密解

本報告に用いた試料は島根県宍道湖南部に分布する来待砂岩などであり、物性値を表 1 に示す。

実験では直径 50 mm・高さ 50 mm の円柱供試体および、直径 50 mm と 100 mm の球状供試体を、それぞれ乾燥と飽和の 2 種類の状態で準備した。冷却過程では、設定温度の不凍液で満たされた循環式恒温装置に常温の供試体を投入し、データロガーで低温環境下の中心温度と側面温度の変化を観測した。冷却終了後は常温環

境下でピーカーに入れて放熱過程を観測した。表 1 に示した試料のうち砂岩について乾燥状態と飽和状態の供試体を、-10 °C の低温環境下に設置したときの中心温度の計測結果を図 1 に示す。

表 1 常温時の基本的な物性値 (圧裂強度は飽和供試体)

物性値	凝灰岩	泥岩	砂岩
乾燥密度 $\rho_d$ , g/cm <sup>3</sup>	1.728	0.729	1.992
間隙率 $n$ , %	31.1	43.8	18.7
圧裂強度 $\sigma_t$ , MPa	0.489	0.181	1.770

飽和状態では、間隙水が氷に相変化する際に潜熱が発生し、0℃付近において温度低下が一時的に停留する。本節は、乾燥状態の供試体に対し実施した冷却実験を解釈できる適切な境界条件について検討する。先ず円柱供試体の熱伝導問題を、円柱座標系として定式化すれば支配方程式として次式を得る。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$T$  は供試体の温度 (°C),  $t$  は時間 (秒),  $r$  は中心からの半径方向距離 (m),  $\alpha = \kappa/(\rho C)$  は熱拡散率 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) である。境界条件を Dirichlet 境界とする時は、外部温度を  $T_w$ , 供試体の半径を  $L$  とすれば次式となる。

$$T = T_w, \quad (r = L) \quad (2)$$

一方、境界条件を熱伝達境界とすれば

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=\pm L} = h(T_s - T_w) \quad (3)$$

$h$  は熱伝達係数 ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ),  $\kappa$  は熱伝導率であり、 $T_s$  は供試体表面の温度である。 $T_s$  は供試体に貼付けたゲージで計測できるが、式 (3) 左辺の温度勾配は供試体の表面近傍における半径方向の値であるから、熱伝達係数  $h$  を実験的に定めることはできない。

上記 2 種類の境界条件に対応する式 (1) の厳密解は次式に集約できる。

$$T(r, t) = T_w + (T_i - T_w) \sum_{j=1}^n u_j(r, t) \quad (4)$$

$T_i$  は供試体の初期温度、 $u_j(r, t)$  は無次元温度である。式 (4) の無次元温度に対する厳密解 [11] により 2 種類の境界条件に対して、それぞれ以下の解 [12] を得る。

・ Dirichlet 境界に対する無次元温度解

$$u_j(r, t) = \frac{2J_0(r\alpha_j/L)}{\alpha_j J_1(\alpha_j)} \exp \left\{ - \left( \frac{\alpha_j}{L} \right)^2 at \right\} \quad (5)$$

・ 熱伝達境界に対する無次元温度解

$$u_j(r, t) = \frac{2J_0(r\beta_j/L) \cdot J_1(\beta_j)}{\beta_j \cdot \{J_0^2(\beta_j) + J_1^2(\beta_j)\}} \exp \left\{ - \left( \frac{\beta_j}{L} \right)^2 at \right\} \quad (6)$$

$J_n(x)$  は第 1 種  $n$  次のベッセル関数であり、 $\alpha_j$  は  $J_0(x)$  と  $x$  軸との交点座標、 $\beta_j$  は以下を満足する値である。

$$\beta_j \cdot J_1(\beta_j) = Bi \cdot J_0(\beta_j) \quad (7)$$

$Bi = Lh/\kappa$  は無次元量のビオ数である。式 (7) は  $\beta_j$  を陽に解けない超越方程式であるが、数式処理ソフトで交点の  $x$  座標  $\beta_j$  を精度よく決定 [13] できる。以上の関係を  $-10$  °C の円柱供試体の

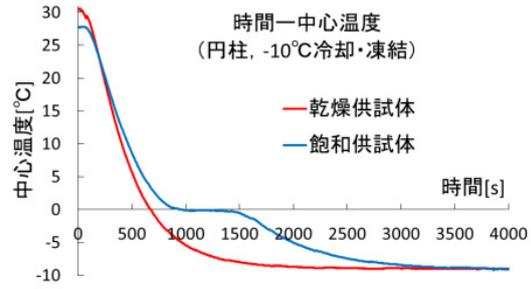


図 1 中心温度の時間変化

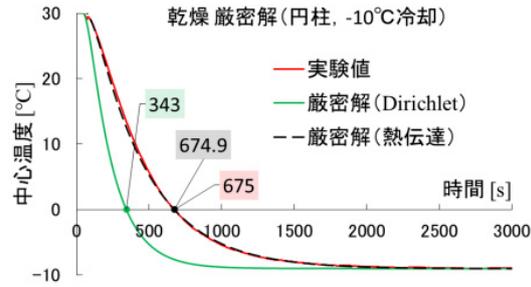


図 2 実験値と厳密解の比較

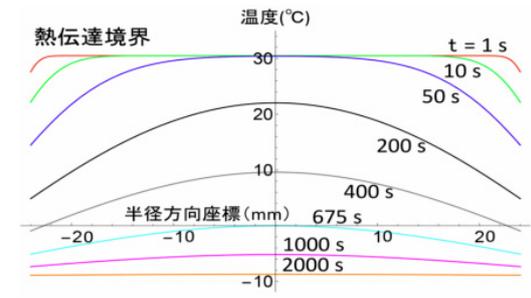


図 3 半径方向の温度分布 (熱伝達境界)

場合に適用すると、図-2 を得る。実験値と熱伝達境界による厳密解は良く一致している。熱伝達境界における半径方向の温度分布を 図-3 に示す。熱伝達境界の場合は、両端の温度勾配が緩やかなまま経時変化していく様子が確認でき、実験値と一致する。

#### 4.2 乾燥した球状供試体の挙動と厳密解

球状供試体の熱伝導問題を、球座標を用いて定式化すれば支配方程式は次式となる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (8)$$

ここで、変数は式 (1) と同一である。Dirichlet 境界の場合は式 (2)、熱伝達境界では式 (3) を満足することも円柱と同様である。上記 2 種類の境界条件に対して式 (4) と同様に、式 (8) の厳密解を次式で表す。

$$T(r, t) = T_w + (T_i - T_w) \sum_{\nu=1}^n \theta_{\nu}(r, t) \quad (9)$$

ここで、 $\theta_{\nu}(r, t)$  は無次元温度であり、その他の変数は式 (4) と同一である。この境界条件に対して、以下の無次元温度解 [12] を得る。

・ Dirichlet 境界に対する無次元温度解

$$\theta_{\nu}(r, t) = \frac{2(-1)^{\nu+1} \sin\left(\frac{\nu\pi r}{L}\right)}{\frac{\nu\pi r}{L}} \exp\left\{-\frac{(\pi\nu)^2}{L^2} \alpha t\right\} \quad (10)$$

・ 熱伝達境界に対する無次元温度解

$$\begin{cases} \theta_{\nu}(r, t) = 2\Psi_{\nu}(r) \exp\left\{-\frac{(\psi_{\nu})^2}{L^2} \alpha t\right\} \\ \Psi_{\nu}(r) = \frac{\sin \psi_{\nu} - \psi_{\nu} \cos \psi_{\nu}}{\psi_{\nu} - \sin \psi_{\nu} \cos \psi_{\nu}} \sin\left(\frac{\psi_{\nu} r}{L}\right) \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 $\psi_{\nu}$  は以下を満足する値である。

$$\frac{Bi}{\psi_{\nu}} = \frac{1}{\psi_{\nu}} - \cot(\psi_{\nu}) \quad (12)$$

球状供試体の熱伝達境界では式 (12) で表される超越方程式から変数  $\psi_{\nu}$  の値を求め、この  $\psi_{\nu}$  を式 (11) に代入し無次元温度  $\theta_{\nu}(r, t)$  を決定できる。図-4 は、環境温度が  $-10^{\circ}\text{C}$  の球状供試体の冷却過程を表している。以上から球状供試体の実験値と熱伝達境界による厳密解はよく一致する。続いて直径 50 及び 100 mm の球状供試体を用いて冷却試験を実施した。中心温度の変化を円柱の結果と共に示すと図-5 を得る。形状や体積によらず、適切な熱伝達係数を用いて乾燥供試体において厳密解と実験値は一致した。環境温度と直径の違いに関わらず、全ての実験条件において同様の結果を得た。さらに、円柱供試体と球状供試体のビオ数の環境温度依存性を図-6 に示す。

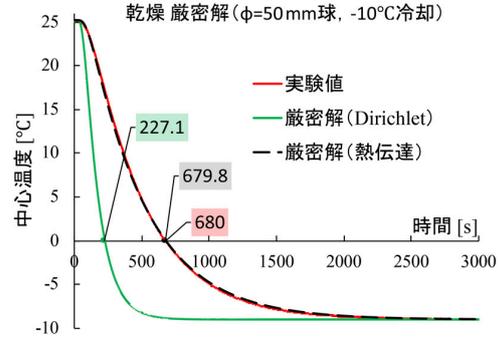


図 4 球状供試体の中心温度

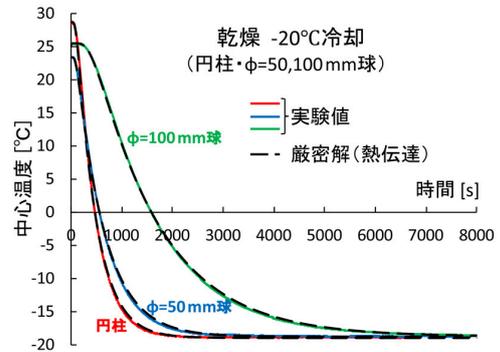


図 5 円柱と球状供試体の中心温度

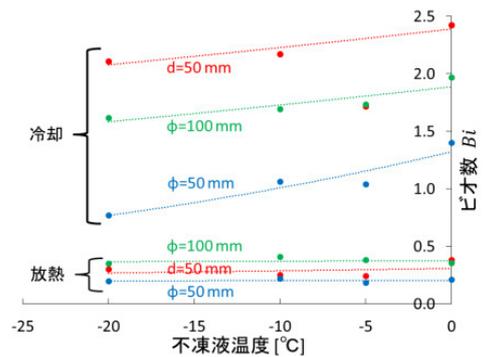


図 6 ビオ数の環境温度依存性

冷却過程において供試体の形状や大きさによらず、環境温度の低下と共にピオ数は低下する事が判る。なお、熱物性の評価にあたっては文献 [14] も参考にした。

### 4.3 湿潤飽和状態の挙動

飽和状態の円柱供試体について、潜熱による効果を考慮した数値解析 [15] を実施した結果 [16] を図-7 に示す。0 °C 付近において温度の停留状態を表現できることが判る。以上の検討から、飽和状態の円柱供試体においては間隙水の相転移を考慮した数値解析により温度変化を適切に表現できることを示した。流れ場に置かれた凍結管周りの挙動については、発表論文①，②を参照されたい。

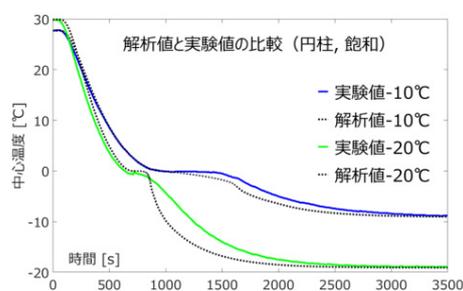


図 7 飽和供試体の挙動

## 参考文献

- [1] Hobbs, P.V. : *Ice Physics*, Clarendon Press, 1974.
- [2] Stewartson, K. & Waechter, R.T. : On Stefan's problem for spheres, *Proc.R.Soc.London*, A 348, 1976.
- [3] Crank, J : *Free and Moving Boundary Problems*, Clarendon Press, Oxford, 1984.
- [4] Kholpanov, L.P., Zakiev S.E. & Fedotov, V.A. : *Theoretical Found. of Chem.Eng.*, 37-2, pp.113-121, 2003.
- [5] Yamabe, T. & Neaupane, K.M. : Determination of some thermo mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 38, pp.1029-1034, 2001.
- [6] Neaupane, K.M. & Yamabe, T. : A fully coupled thermo hydro mechanical nonlinear model for a frozen medium, *Computers and Geotechnics*, 28 (8), pp.613-637, 2001.
- [7] 石山宏二, 渡辺邦夫, 山辺正, 野本寿 : 低温熱環境下における岩盤の温度分布特性-釜石鉱山における岩盤凍結融解試験, *応用地質*, 37 (2), pp. 2-10, 1996.
- [8] Yow, J.L. & Hunt, J.R. : Coupled process in rock mass performance with emphasis on nuclear waste isolation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 39 (2), pp.143-150, 2002.
- [9] Kolditz,O., Görke,U-J., Shao,H. & Wang,W. ed. : *Thermo Hydro Mechanical Chemical Processes in Fractured Porous Media*, Springer, 2012.
- [10] Ijam, N.K., Yamabe, T. & Sudisman, R.A. : Heat transfer characteristics of Tage Tuff under Freeze-thaw Environment, *Proc. of the 14th JRMS*, Paper 0085, pp.1 - 6, 2017.
- [11] Carslaw, H.S. & Jaeger, J.C. : *Conduction of Heat in Solids, 1st. & 2nd. ed.*, Clarendon Press, Oxford, 1946 & 1959.
- [12] Jakob, M. : *Heat Transfer*, Vol.1, Ch.13, John Wiley, New York, 1949.
- [13] 山辺 正 : 堆積軟岩の凍結融解問題における境界条件の検討, 第 38 回西日本岩盤力学シンポジウム, pp.23-26, 2017.
- [14] 伊東良晴, 藤森裕基, 名古屋啓太, 竹村貴人 : 熱力学の視点から見た多孔質岩の熱物性精密測定と微小空孔の評価, *13th Japan Symposium on Rock Mechanics & 6th Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering*, pp.793-796, 2013.
- [15] 飛田大二郎 : 低温環境下における地盤内の熱-浸透問題に関する数値解析的研究, 埼玉大学理工学研究科 環境社会基盤コース, 2015.
- [16] 市川 敦也 : 来待砂岩の低温伝熱特性に関する検討, 埼玉大学工学部 建設工学科, 2019.

## 5 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] (計 2 件)

① Rangga SUDISMAN, Masahiko OSADA & Tadashi YAMABE ; Experimental Investigation on Effects of Water Flow to the Freezing Sand around Vertically Buried Freezing Pipe, Journal of Cold Regions Engineering, ASCE, Vol.33 No.3, 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000187

② Rangga SUDISMAN, Masahiko OSADA & Tadashi YAMABE ; Heat Transfer Visualization of the Application of a Cooling Pipe in Sand with Flowing Pore Water, Journal of Cold Regions Engineering, ASCE, Vol.31 No.1, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000115

[ 学会発表 ] (計 5 件)

① 山辺 正, 市川 敦也 ; 乾燥来待砂岩の伝熱特性と厳密解による検討, 第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 117- 122, 平成 31(2019) 年 1 月.

② Yoshiharu ITO, Takato TAKEMURA, Hiroki FUJIMORI; Melting/freezing temperature of water confined in pore space of sedimentary rock by means of differential scanning calorimetry (DSC), The 2nd Asian Conference on Permafrost (ACOP2017), #07-10, Sapporo, 5th Jul., 2017.

③ Nabin Kumar IJAM, Tadashi YAMABE & Rangga SUDISMAN ; Heat transfer characteristics of Tage Tuff under Freeze-thaw Environment, Proceedings of the 14th Japan Symposium on Rock Mechanics Japan Society for Rock Mechanics, Paper 085, Jan. 2017.

④ Rangga SUDISMAN, Tadashi YAMABE & Masahiko OSADA ; Strain and Strength of Saturated and Dried Rock Samples Under a Freeze-Thaw Cycle, 9th Asian Rock Mechanics Symposium, 18-20, Bali, Indonesia, October 2016.

⑤ Rangga SUDISMAN, Tadashi YAMABE & Masahiko OSADA ; Strain Characteristic of Dried Rocks Sample under Freezing and Thawing Condition, Proc. of 13 th ISRM Congress of Rock Mechanics, Canada, 2015.

## 6 研究組織

(1) 研究代表者

山辺 正 (YAMABE, Tadashi) 埼玉大学・理工学研究科・准教授・研究者番号 : 40125894

(2) 研究分担者

① 長田 昌彦 (OSADA, Masahiko) 埼玉大学・理工学研究科・教授・研究者番号 : 00214114

② 川本 健 (KAWAMOTO, Ken) 埼玉大学・理工学研究科・教授・研究者番号 : 50292644

③ 浅本 晋吾 (ASAMOTO, Shingo) 埼玉大学・理工学研究科・准教授・研究者番号 : 50436333

④ 竹村 貴人 (TAKEMURA, Takato) 日本大学・文理学部・教授・研究者番号 : 30359591

⑤ 竹内 真司 (TAKECHI, Shinji) 日本大学・文理学部・教授・研究者番号 : 90421677

⑥ 橘 伸也 (TACHIBANA, Shinya) 神戸大学・都市安全研究センター・講師・研究者番号 : 90432567

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。