

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02238

研究課題名（和文）大気圧変動を外力とした原位置岩盤の浸透特性評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of a method to evaluate permeability of rock using barometric fluctuation

研究代表者

長田 昌彦（Osada, Masahiko）

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：00214114

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：高レベル放射性廃棄物の地層処分プロジェクトにおける地下水シナリオを適切に評価するためには、掘削影響領域における浸透特性とその時間変化を評価することが重要である。本研究では、自然現象として日々変化している大気圧変動を浸透特性評価のための外力として活用することによって、坑道内のいたるところで計測可能であり、かつ長期にわたる岩盤の浸透特性の変化を連続的に計測できる手法を開発することを目的として、現地計測と室内実験を実施した。その結果、大気圧変動を利用して、トンネル壁面での浸透特性を評価しうることを示した。また多点で計測することによって、堆積岩に特徴的な浸透特性の異方性も評価しうる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

岩盤の浸透特性は、様々な社会基盤を創成するうえで、必要な物性値である。本研究の成果により、簡便に、安価に、岩石の浸透特性をその異方性を含めて評価できるようになったことは、有用と考えられる。さらに、地層処分プロジェクトにおいては、経時変化を踏まえた物性評価が必要であり、これに貢献しうる手法を提案できたと考えている。

研究成果の概要（英文）：In order to properly assess groundwater scenarios for HLW geological disposal projects, it is important to evaluate the hydraulic properties and their temporal changes in the excavation-damaged zone. In this study, field measurements and laboratory experiments were carried out with the aim of developing a method that can be used to continuously measure changes in rock hydraulic properties over a long period of time and that can be measured anywhere in the tunnel by utilizing atmospheric pressure fluctuations, which change daily as a natural phenomenon, as an external force for assessing hydraulic properties. The results showed that atmospheric pressure fluctuations can be used to evaluate the hydraulic properties at the tunnel wall. It was also shown that multi-point measurements could be used to evaluate the anisotropy of hydraulic properties of sedimentary rocks.

研究分野：地盤工学

キーワード：岩盤の浸透特性 大気圧変動 間隙空気圧 モンテリ地下研究所 オパリナスクレイ 時系列解析

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分プロジェクトにおける地下水シナリオを適切に設定するためには、掘削影響領域(Excavation Damaged Zone: EDZ)における水理的及び力学的な岩盤物性とその時間変化を評価することが重要である。しかしながら、既往の研究での EDZ の領域推定は、弾性波トモグラフィ、比抵抗トモグラフィなどの非破壊探査と原位置透水試験を組み合わせることで評価されることが多く、ある時間断面における間欠的なデータ取得となっており、透水試験結果と直接的な比較が困難である場合が多い。EDZ の形成が掘削による応力開放のみではなく、その後の温湿度環境の変化による含水率の変化などにより時間とともに拡大していくことを考慮するためには、連続データとして EDZ の拡がりや岩盤の浸透特性を同時観測できることが望ましい。また坑道全体から見れば、非常に限られた局所的な箇所での計測となっており、処分システム全体として評価するためには、坑道内でのいたるところで実施可能な手法であることが望ましい。したがって、坑道内でのいたるところで計測可能であり、かつ長期にわたる岩盤の浸透特性の変化を連続的に計測できる手法が必要である。

2. 研究の目的

本研究課題では、上記の背景を踏まえ、EDZ の領域推定とその場の浸透特性を同時に評価しうる手法を開発することを目的とする。

浸透特性の評価を行うためには、水圧をかける、間隙水を注水するなど、人為的に外力を加える必要がある。しかし、このような方法では、長期にわたり浸透特性の評価をすることは困難であると考えられた。そこで、本研究課題では、自然現象として日々変化している大気圧変動を浸透特性評価のための外力として活用することとして、評価手法の開発に臨む。

図1に、提案した観測方法のコンセプトを示す。地下にトンネルのような空洞を開けると、そこには大気が流入し、トンネル内の気圧が変動する。これを外力として用いる。例えば、不飽和状態にあるトンネル壁面から奥行き方向に、深さの異なる直径数 cm のボーリング孔を開け、この中に温湿度・気圧センサを埋設し、充填剤あるいはメカニカルパッカーでトンネル内の空気から孤立した空間を作る。このとき、図1中に模式的に示したように、トンネル内の気圧が三角波のように変動するとき、異なる深さに埋設された各センサの気圧は、位相のずれと振幅の減衰を伴って観測されると考えられる。これらが観測されれば、その大きさを

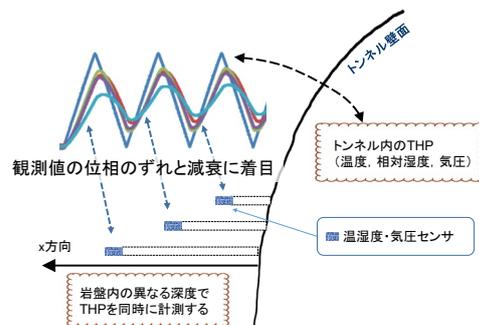


図1 提案した観測方法のコンセプト

考慮することで、ある飽和度のときの岩盤の浸透特性が求まる。さらに異なる深さで位相のずれと振幅の減衰が観測されれば、それぞれの区間の浸透特性も推定可能である。

3. 研究の方法

本研究課題の研究方法は、大きく3つに区分される。

(1) スイス・モンテリ地下研究所での現地計測

2018年7月より放射性廃棄物の地層処分の国際共同研究施設であるスイス・モンテリ地下研究所にて、トンネルの中の岩盤内で気圧変化を計測することを試みている(図2参照)。計測対象は、オパリナスクレイと呼ばれる泥質岩である。計測センサには、気圧と同時に温度と湿度を計測できるものを用いており、様々な応答関係が検討できる。センサの埋設深度は、壁面から5cm、10cm、16cmの3段階である。



図2 モンテリ地下研究所での観測機器の設置状況

本研究課題では、このサイトを最大限利用して、実施する。初めての試みであり、計測センサ等からの出力が安定しているか否かを確かめつつ、設置方法等を検討する。

2023年度本研究課題の終了時点では、合計6孔を掘削して、連続計測を続けている。

(2) 吉見百穴地下軍需工場跡を利用した測定機器の準備

2020年度からの新型コロナウイルス感染拡大のため、スイスでの現地計測が困難となったため、国内のサイトとして、埼玉県の史跡である吉見百穴に掘削された地下軍需工場跡坑道を利用させていただき、計測機器や計測方法の開発や改良を実施した。

(3) 室内実験によるブロック内孤立空間における気圧変化挙動の評価

原位置での気圧変化の挙動を説明するために、岩石ブロックを用いた室内実験を実施する。オパリナスクレイと比較して透水性の高い岩石を用いて、乾燥に伴うブロック内孤立空間の大気圧変動に対する空気圧変化を計測する。

また、気圧が変化したときに、ブロック内孤立空間に位相のずれや、振幅の減衰が生じるか否かを確認するために、図3に示したように、ブロックを真空デシケータの中に設置し、真空コントローラを介して、周期的に気圧変動を与える実験を実施し、その傾向を調べる。

さらに、孤立空間内の気圧を、人為的に減圧したあとに減圧回路を閉じ、その回復過程を観測することで、岩石の浸透特性を求める方法について検討を加える。

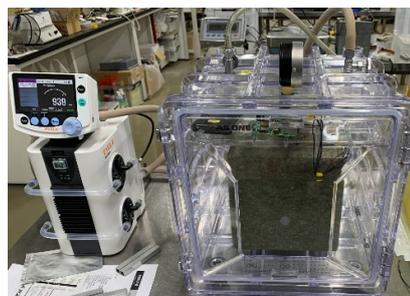


図3 周期的な気圧変動を与えるシステム

(4) 数値解析コードの整備

気圧の変化に伴う孤立空間内での間隙空気圧挙動をモデル化できるように、数値解析コードを整備する。具体的には、気圧変動に伴って岩石自体は変形しないと仮定した場合（Katzの方法）と多孔質媒体を仮定して変形を許容した場合（Braceの方法）について検討する。

4. 研究成果

(1) スイス・モンテリ地下研究所での現地計測結果

図4に、スイス・モンテリ地下研究所での現地計測結果の一例を示す。孔の深度5cmと16cm、およびトンネル内の大気圧を計測している3つのセンサからの出力を時系列に並べたものである。これより、3点の大気圧は、判別できないほど一致しているのに対して、孤立空間内の気圧は、位相のずれと振幅の減衰を示しており、深いほど、大きな位相のずれと振幅の減衰が見られる。このようなデータを、期間を区切って位相のずれと振幅の減衰を算出し、期間毎の差異を追跡することで、浸透特性の変化を見積もることが可能である。

このようなデータが現在も蓄積されつつある。さらに長期的な変化傾向を観測していくことによって、岩盤の浸透特性が変化したかどうかの判定に用いることが可能となる。

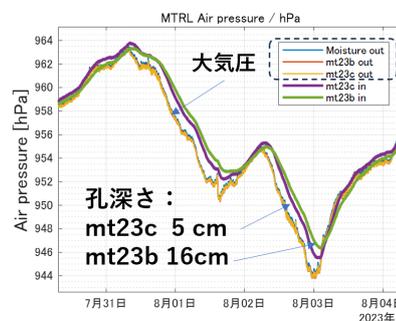


図4 スイス・モンテリ地下研究所での現地計測結果の一例

(2) スイス・モンテリ地下研究所での減圧実験結果

非定常な大気圧変動に対する、位相のずれと振幅の減衰を観測しているだけでは、岩盤の浸透特性を求めることは必ずしも容易ではない。

そこで、その時々々の透気係数の値を求めるために、気圧計入りのプラスチック製試験管サンプルを用いた細孔用のセンサを作製した。

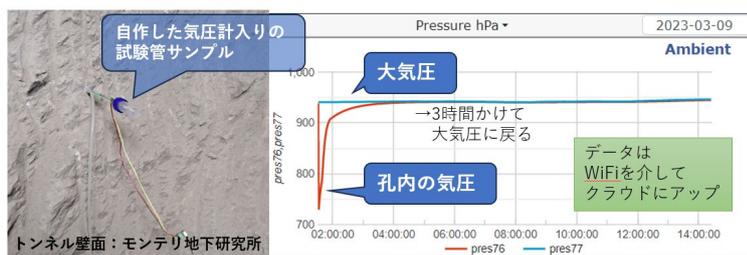


図5 原位置での減圧実験の写真（左）と測定データ（右）

これを用いて、原位置で減圧実験を行った。モンテリ地下研究所において、直径5mmのドリル孔を掘削し、細孔内の気圧を減圧させた後の回復過程を観測したものが、図5である。200kPa程度減圧したあと、大気圧まで回復するのに3時間を要しており、システムとしてのリーク量を差し引いて、この過程より、数値解析的な援用を経て、この時点での透気係数を算出できることがわかった。

(3) スイス・モンテリ地下研究所での孤立空間内の湿度の長期変化

原位置データについて、相対湿度の観測データから、深い位置にセンサを埋設した空間内の湿度は、1年以上かけてようやく相対湿度100%に近づいたことが観測され、その到達時間はトンネルからの深度に依存し、深い方がより遅れることがわかった。このことは、放射性廃棄物を埋め戻した後に地下水が戻ってくることを想定している地層処分事業において、有意義な情報となる可能性がある。

(4) 室内実験によるブロック内孤立空間における気圧変化挙動の評価

室内実験によって、外気圧の変化が孤立空間に与える影響を評価し、浸透特性を適切に評価しうるかを検討した。

浸透特性の大きく異なる井内粘板岩と田下凝灰岩という2種類の岩石を用意し、一般的な透気試験方法にて円柱供試体の固有透過度を求め、これを真値とした。次に、ブロックの中心まで小孔を開け、この中に温度・湿度・気圧センサを埋設した同じ岩種の20cm角ブロック乾燥供試体を、密閉容器内に置き、容器内の気圧を真空コントローラで変化させることにより、次の2つ試験を実施した。

一つは、トランジェントパルス法に類似した方法であり、大気圧状態からブロックの外側に一定の減圧を与え、孤立空間内の気圧を観測した(減圧実験とよぶ)。凝灰岩では約8分で、粘板岩では約45分で外気圧に収束し、材料による浸透特性の違いを示した。田下凝灰岩を用いたときの結果を図6に示す。図には固有透過度をパラメトリックに変化させてBraceの方法により計算した気圧変化を1点鎖線で示している。赤点で示された孤立空間内の気圧(in)と、固有透過度 $1E-15\text{ m}^2$ の値がほぼ同じ曲線を通しており、またこの値が真値に近いことから、減圧実験により、そのときの透気係数が求まることがわかった。

もう一つの方法は、同じブロック試料に対して、ブロック外側の気圧を周期的に変化させるオシレーション法を採用した。オシレーション法では気圧変動の振幅は一定とし、周期を4分、8分、16分と変化させて応答を観測した。その結果、図7に示すように、明瞭な位相のずれが観測されること、振幅減衰の大きさは与えた周期に依存することがわかった。また飽和度を変化させて同じ実験を実施したところ、大気圧から周期的な気圧変動の中央値に至るまでの過渡的な挙動が、飽和度に依存して変化していることがわかった。

以上より、大気圧変動程度の気圧変化に対しても、減圧実験やオシレーション法を適用することによって、固有透過度が求められることが示された。

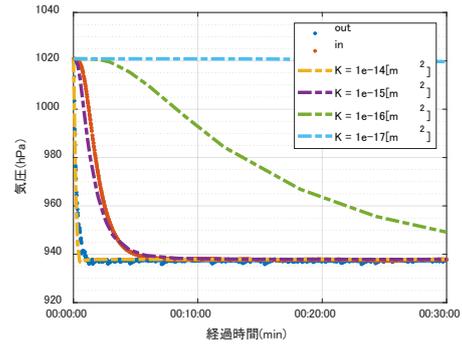


図6 田下凝灰岩のブロック減圧実験

もう一つの方法は、同じブロック試料に対して、ブロック外側の気圧を周期的に変化させるオシレーション法を採用した。オシレーション法では気圧変動の振幅は一定とし、周期を4分、8分、16分と変化させて応答を観測した。その結果、図7に示すように、明瞭な位相のずれが観測されること、振幅減衰の大きさは与えた周期に依存することがわかった。また飽和度を変化させて同じ実験を実施したところ、大気圧から周期的な気圧変動の中央値に至るまでの過渡的な挙動が、飽和度に依存して変化していることがわかった。

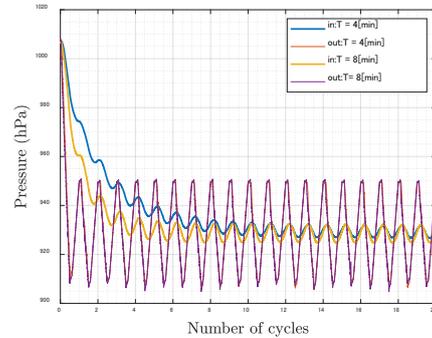


図7 井内粘板岩のオシレーション実験結果

(5) 室内減圧実験による岩石の透気異方性の評価

(2) に記述した自作したセンサを用いて、岩石の透気異方性を求めることを試みた。図ブロックに、図8の左側に示したように、9つの孔を開け、9つのセンサを埋設した。試料には、弱い構造異方性を有する田下凝灰岩を用い、堆積面を考慮して2つのブロック試料を用意した。試験は、中央の穴から減圧して、周辺の8つの孔で気圧応答を記録する方法である。

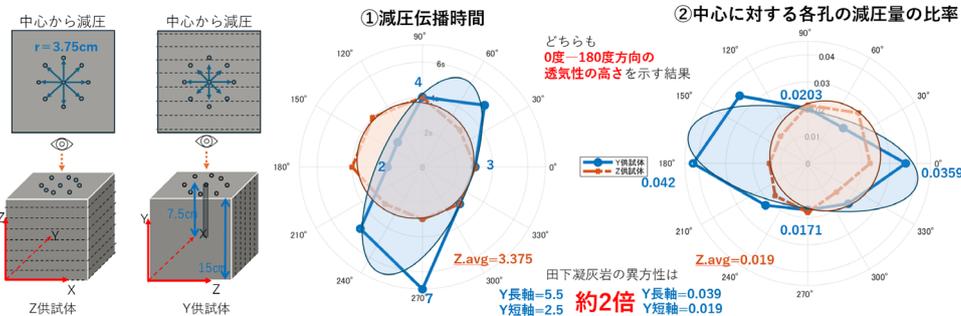


図8 田下凝灰岩ブロックを用いた透気異方性の実験結果

その結果、図8の右側に示すように、方向によって、減圧伝播時間と各孔の減圧量が異なり、田下凝灰岩では、2倍程度の異方性があることが示された。この方法は、細孔さえ開けられれば、原位置でも適用可能であり、原位置での局所的な異方性を数多く把握する手法として有用である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6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 竹村貴人, 作道 悠, 細野日向子, 長田昌彦	4. 巻 63
2. 論文標題 ワンボードマイコンArduinoでの原位置データ測定と実験装置作成	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 応用地質	6. 最初と最後の頁 307 - 313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 長田昌彦, 小澤一稀, 船引耕平, 金子義人, 高橋優輔	4. 巻 63
2. 論文標題 史跡でのIoT技術の活用事例	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 応用地質	6. 最初と最後の頁 297 - 306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Togashi Yota, Imano Takanobu, Osada Masahiko, Hosoda Koichi, Ogawa Koji	4. 巻 138
2. 論文標題 Principal strain rotation of anisotropic tuff due to continuous water-content variation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences	6. 最初と最後の頁 104646 ~ 104646
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijrmms.2021.104646	査読の有無 無
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 Togashi Yota, Mizuo Kazuki, Osada Masahiko, Yamabe Tadashi, Kameya Hiroshi	4. 巻 143
2. 論文標題 Evaluating changes in the degree of saturation in excavation disturbed zones using a stochastic differential equation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computers and Geotechnics	6. 最初と最後の頁 104598 ~ 104598
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compgeo.2021.104598	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 長田 昌彦, 竹村 貴人, 五嶋 壮太, 富樫 陽太, 大沢 光司	4. 巻 15
2. 論文標題 大気圧変動に対する飽和度低下による間隙空気圧変化の時系列解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 岩の力学国内シンポジウム講演集	6. 最初と最後の頁 221-226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 小田部 晏彦, 富樫 陽太, 畠山 健, 長田 昌彦	4. 巻 73(3)
2. 論文標題 田下凝灰岩の不飽和強度特性と乾燥過程における水分特性曲線	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 212-219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.73.212	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20件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 長田昌彦, 大沢光司, クリスティーナブツリ, 野澤海人
2. 発表標題 外気圧の周期的変動に対する岩石ブロック内の気圧応答
3. 学会等名 日本応用地質学会, 令和4年度研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹村 貴人, 細野 日向子, 作道 悠, 川北 章悟, 鈴木 健一郎
2. 発表標題 亀裂性岩盤の3次元透水テンソルの推定方法と異方応力下での透水性に関する検討
3. 学会等名 日本応用地質学会, 令和4年度研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Neranjana Ranaweera, Yota Togashi
2. 発表標題 Influence of advection and diffusion on water content changes in tuff deformation during the drying process
3. 学会等名 地盤工学会, GeoKanto2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ranaweera N, Togashi Y, Osada M, Kawanoue R
2. 発表標題 Numerical approach to evaluate the influence of water saturation on the strength of Neogene Tuff in Utsunomiya city, Japan
3. 学会等名 ISRM, Proc. EUROCK2022 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小田部 晏彦, 富樫 陽太, 長田 昌彦, 畠山 健
2. 発表標題 含水に伴う田下凝灰岩の強度変化と平均応力変化によるモデル化
3. 学会等名 土木学会, 第49回岩盤力学に関するシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 李 楊, 川北 章悟, 朝比奈 大輔, 竹村 貴人
2. 発表標題 間隙水圧の周期的変動が岩石亀裂の透水係数に与える影響 実験的検討
3. 学会等名 JpGU2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長田昌彦, 船引耕平, 高橋優輔
2. 発表標題 長期モニタリングによる多孔質凝灰岩の割れ目開口幅の季節変化
3. 学会等名 日本応用地質学会令和3年度研究発表会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 作道 悠, 宿澤 未波, 竹村 貴人
2. 発表標題 堆積軟岩石からなる遺跡石材の浸水・乾燥繰り返し試験機 による損傷過程の評価
3. 学会等名 日本応用地質学会令和3年度研究発表会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiko Osada and Kohei Funabiki
2. 発表標題 Seasonal change of a fracture aperture in porous tuffaceous rock with 0.01mm-order real-time monitoring
3. 学会等名 5th International Workshop on Rock Mechanics and Engineering Geology in Volcanic Fields (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mizuo K., Togashi Y. & Osada M.
2. 発表標題 Exact solution of Richard's equation using heat transfer boundary and application to dry-induced deformation behavior of Tago tuff
3. 学会等名 5th International Workshop on Rock Mechanics and Engineering Geology in Volcanic Fields (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Togashi Y., Imano T. & Osada M.
2. 発表標題 Deformation characteristics of sedimentary rock due to continuous changes of moisture content in wetting process
3. 学会等名 Proc. ACUUS2020 (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takemura, T.
2. 発表標題 Development of a test method for the effects of cyclic dry and wet damage to archaeological stone
3. 学会等名 JpGU-EGU2022, MIS04-P01 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長田昌彦, 小澤一稀, 船引耕平, 弓明義
2. 発表標題 長期観測により確認された降雨に伴う凝灰岩開口割れ目の変位挙動
3. 学会等名 日本応用地質学会令和2年度研究発表会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹村貴人, 朝比奈大輔, 佐藤 稔
2. 発表標題 二酸化炭素地下貯留サイトとしての堆積岩類のせん断面形成過程と透水挙動に関する実験的研究
3. 学会等名 日本応用地質学会令和2年度研究発表会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Togashi Yota, Osada Masahiko, Yamabe Tadashi
2. 発表標題 Rotation of three principal strains of tuff during drying shrinkage
3. 学会等名 Proc. EUROCK 2020, 2020-175, 7 pages. (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahiko Osada, Koji Osawa, Christina Putri Widyaningtyas, Yota Togashi
2. 発表標題 Fundamental study on estimation of permeability at in-situ EDZ from pore air pressure response
3. 学会等名 15th ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium. Schubert & Kluckner (eds.) OCTOBER 09th - 14th, 2023, SALZBURG CONGRESS, AUSTRIA, pp.2581-2585,2023. (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小田部 晏彦, 富樫 陽太, 畠山 健, 長田 昌彦
2. 発表標題 不飽和状態における田下凝灰岩の強度特性
3. 学会等名 第50回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.108-113, 2024.
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Masahiko Osada
2. 発表標題 Long Term Measurements in Engineering Geology
3. 学会等名 14th Asian Regional Conference of IAEG, Universiti Teknologi Malaysia (UTM) Kuala Lumpur, Malaysia, 26th-29th February, 2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024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	竹村 貴人 (Takemura Takato) (30359591)	日本大学・文理学部・教授 (32665)	
研究 分担者	富樫 陽太 (Togashi Yota) (90753294)	埼玉大学・理工学研究科・助教 (12401)	

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
---------	---------