

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15489

研究課題名（和文）地層処分では変質は悪なのか？ - ベントナイトの変質に着目した天然バリアの物性の解明

研究課題名（英文）Evaluation of properties of engineered and natural barriers focusing on the alteration of bentonite

研究代表者

河野 勝宣（KOHNO, Masanori）

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60640901

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）：放射性廃棄物の地層処分において、ベントナイトの変質による膨潤性能や透水性の低下は、緩衝材の性能を劣化させる負の効果である反面、岩盤中の亀裂を閉塞させる正の効果と捉えることもできる。ベントナイトに作用する変質のタイプの違いにより、岩盤中の亀裂の閉塞の程度や、閉塞鉱物の組成も異なることが考えられ、それに対応して岩盤の透水性も異なることが予想される。本研究は、人工バリア材（ベントナイト系材料）、天然バリア材（結晶質岩）および両バリア材の境界を対象として、地層処分に關わる人工・天然バリア材の物性に及ぼす変質タイプと変質鉱物（主に粘土鉱物）の影響の一端を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、地層処分に關わる人工・天然バリア材のより確実な長期安全性の実現に対して、これまで知り得なかった情報を取得でき、さらに、地下環境の状況に応じた適切なバリア材の選定・管理にも貢献できると考える。一方、近年の地震、津波、火山噴火などの地表での被害を考えると、力学的に安定した地下岩盤利用の可能性を広げることは必須である。地下環境下での透水性などの物性の把握により、地下環境の有効利用やエネルギー資源抽出・掘削の際の安定性評価、さらに、遮水壁や地すべり面粘土に關する研究にも展開できると予想される。このように、地盤工学や地殻工学・資源開発分野のみならず幅広い分野において波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In the geological disposal of radioactive waste, the deterioration of swelling performance and permeability due to the alteration of bentonite adversely affects the performance of the cushioning material. However, it can be regarded as a positive effect as it closes the cracks in the bedrock. Depending on the type of alteration occurring on bentonite, the degree of crack blockage in the bedrock and the composition of the blockage minerals may differ. The permeability of the bedrock is expected to differ accordingly. Boundaries between artificial barrier materials (bentonite-based materials), natural barrier materials (crystalline rocks), and both barrier materials are investigated in this study. Some of the effects of altered types and altered minerals (primarily clay minerals) on the physical properties of artificial and natural barrier materials related to geological disposal are clarified herein.

研究分野：地盤工学，岩石力学，土木地質学

キーワード：放射性廃棄物地層処分 人工バリア材 天然バリア材 ベントナイト 粘土鉱物 変質 膨潤圧 透水係数

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

放射性廃棄物の地層処分は、各国で現実味を帯びた重要課題である。これまで、人工バリア材（ベントナイト系材料）の膨潤特性や透水性、セメント系材料との接触による変質やナチュラルアナログに関する研究、また、天然バリア材では、堆積軟岩の力学特性評価、結晶質岩盤の長期透水性評価や亀裂の閉塞に関する研究など、多くの研究が実施されている。

数千年～数百万年間の超長期の安全性を実現するにあたって、人工バリア材（ベントナイト）に及ぼす「変質」の影響は考慮すべき重要項目である。特に、ベントナイト中のモンモリロナイトがイライトに変質する現象については多くの研究成果が蓄積されているが、変質のタイプの違いによる「構成鉱物の組合せと量比」、「変質鉱物の種類や含有量」の影響についての定量的な検討は十分とは言えない。人工バリア材の超長期的な信頼性を高めるためにも、種々のタイプの変質を想定したバリア材の物性評価を行うことは非常に重要である。

一方、天然バリア材に着目すると、結晶質岩盤では、亀裂を閉塞させることによってバリア機能を高めたい立場にある。特に、地層処分に関しては、岩盤中の亀裂の閉塞は、地下水による鉱物析出よりも、むしろ、人工バリア材（ベントナイト）の流動による方が量的にも多く、時間スケール的にも速いと考えられる。そのため、ベントナイトの変質による膨潤性能や透水性能の低下は、緩衝材の性能を劣化させる負の効果である反面、岩盤中の亀裂を閉塞させる正の効果と捉えることもできる。ベントナイトに作用する変質のタイプの違いにより、岩盤中の亀裂の閉塞の程度や、閉塞鉱物の組成も異なることが考えられ、それに対応して岩盤の透水性も異なることが予想される。しかし、変質によるベントナイトの性能劣化と岩盤の亀裂閉塞による性能向上の関係性を明らかにした例はない。そのため、人工バリア材と天然バリア材の境界に着目して、ベントナイト系材料が受ける変質のタイプの違いによる岩盤の亀裂閉塞の程度や、それに応じた岩盤の物性を評価することは非常に重要である。

## 2. 研究の目的

本研究は、人工バリア材（ベントナイト系材料）、天然バリア材（結晶質岩）および両バリア材の境界を対象として、地層処分に関わる人工・天然バリア材の物性に及ぼす変質タイプと変質鉱物（主に粘土鉱物）の影響を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) まず、1 次元膨潤圧試験装置および加圧式の定圧透水試験装置を用いて、ベントナイトの変質鉱物を想定して、種々の粘土鉱物を主成分とする締固めた粘土試料の膨潤特性と透水性を調べる。また、種々の溶液に浸漬させて変質反応促進を施した Na 型ベントナイト（変質ベントナイト）の膨潤特性および透水性に及ぼす化学的要因（溶液種の違い）の影響を調べる。さらに、ベントナイト系材料（Na 型ベントナイトと珪砂の混合材料）に対して、超長期使用による変質によって、ベントナイト中のモンモリロナイトの一部が変質した場合、その変質の程度に応じて透水性がどのように変化するかを検討する。具体的には、ベントナイト中のモンモリロナイトの一部が変質することでモンモリロナイト含有割合の低下を想定して、変質ベントナイトを様々な割合で置換した供試体を用いて加圧式の定圧透水試験を実施する。得られた実験結果からベントナイト系材料の透水性に及ぼす変質ベントナイト置換率の影響について粉末 X 線回折分析および元素マッピング分析結果を用いて考察する。

(2) まず、岩石供試体用の定水位型透水試験装置の製作を試みる。本装置は、封圧と透水圧（動水勾配）が自由に設定でき、かつ、透水量を分析天秤で計測する仕組みである。次に、本装置を用いてインタクたな稲田花崗岩供試体の透水係数を測定し、既往の研究結果（トランジェントパルス法）と比較することで、製作した試験装置の有用性について確認する。最後に、本装置を用いて巨視き裂を含む岩質材料に各種粘土鉱物（変質鉱物）を充填し、透水性に及ぼす充填粘土鉱物種の影響を明らかにする。

## 4. 研究成果

放射性廃棄物の地層処分に関わる人工・天然バリア材の物性に及ぼす変質タイプと変質鉱物（主に粘土鉱物）の影響について検討した。得られた知見を以下に示す。

(1) 各種粘土試料の膨潤圧は、主成分とする粘土鉱物の種類によって異なることがわかった（図-1 左）。特に、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトおよび  $10\text{\AA}$  ハロイサイト試料は水浸により、層間に多量の水を吸収することにより、単位層間の距離が増大することに起因するものと考えられる。一方、他の非膨潤性粘土鉱物は、単位層間に水を吸収して膨潤しているわけではなく、主に水浸による間隙水圧の発生に伴う（みかけの）膨潤圧と考えることができる。比表面積が大きい粘土試料ほど膨潤圧が大きくなる傾向から、比表面積が大きい粘土試料は、表面張力による吸着水が増加することにより、間隙水圧が大きくなることで、膨潤圧が他の粘土試料に比

べて大きくなったと考えられる。各種粘土試料の透水係数は、主成分とする粘土鉱物の種類によって異なることがわかった (図-1 左)。膨潤圧と同様に、透水係数も比表面積の大きさと密接に関係していることがわかった。さらに、透水係数は膨潤圧が大きくなるにしたがって、低下する傾向が見られ、両者の間には非常に強い相関が見られることがわかった。Kozeny-Carman 則による透水係数  $k_{KC}$  を算出したところ、実験による透水係数と  $k_{KC}$  の間に大きな差はなく (図-1 右)、比表面積と空隙比を用いて透水係数を推定する際には、Kozeny-Carman 則は締固めた粘土試料においても有効な手段になり得ると結論付けた。今後、比表面積の大小による吸着水の量、それに伴う空隙水圧の発生と膨潤圧との関係について、定量的、かつ、総合的に明らかにする必要があるが、以上の結果は、粘土鉱物の種類は粘土材料の物性に影響を及ぼす要因の一つであり、粘土鉱物を含有する地盤・岩盤材料等の物性を評価する上で、貴重な知見になると考えられる。

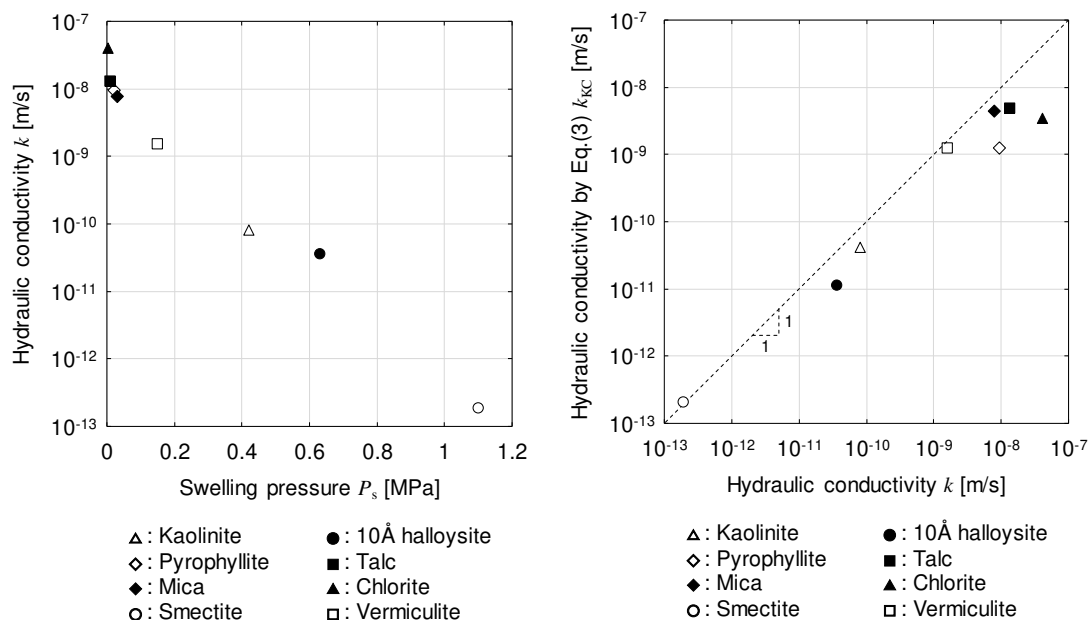


図-1 1種の粘土鉱物を主成分とする粘土試料の膨潤圧と透水係数の関係 (左) と実験における透水係数と Kozeny-Carman 則による透水係数との比較 (右) (材料, Vol.70, No.3, pp.272-278, 2021)

(2) 溶液に浸漬させたベントナイトの膨潤圧および透水係数は、いずれの供試体も Na 型ベントナイトに比べて膨潤圧は低下、透水係数は上昇するとともに、それらの大きさは浸漬させる溶液の種類によって異なることを実験的に示した (図-2)。

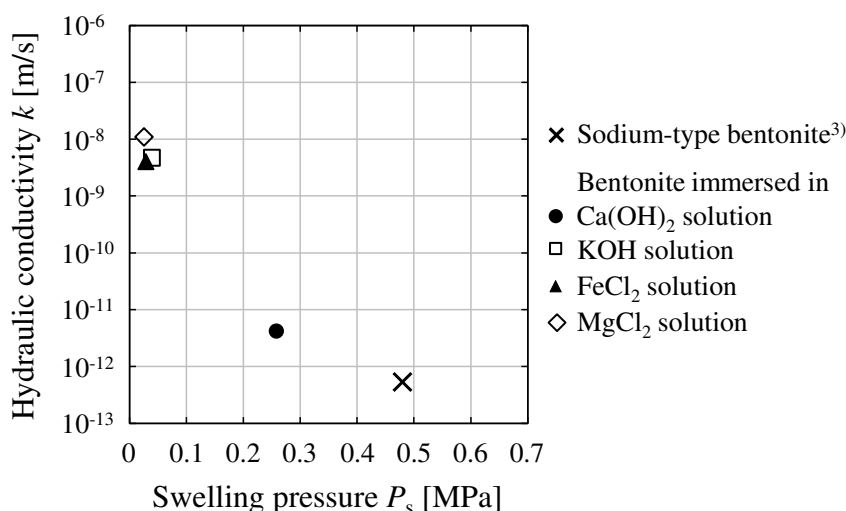


図-2 溶液に水浸させた変質ベントナイトの膨潤圧と透水係数の関係 (図中の文献<sup>3)</sup>は, Kohno et al., Clay Minerals (2018)) (材料, Vol.71, No.4, pp.395-401, 2022)

また、本研究では、これらの差を X 線回折パターンにおけるモンモリロナイトの 12.4Å の回折線と関連付けさせて考察した。変質ベントナイトを様々な割合で置換した供試体は、変質ベントナイト置換率の増加に伴い、透水係数は上昇する傾向がみられるが、置換する変質ベントナイトの種類によってその様相は異なることがわかった (図-3)。本研究では、変質ベントナイトを混合することによる化学的要因の影響の度合いを元素マッピング分析 (図-4) により調べ、その結果と試料の透水性との関係について考察した。これらの結果から、地層処分において、高アルカリ間隙水中の  $K^+$  や、地上から運び込まれる酸素と支保工や岩盤内の鉄分との反応によって生じる金属イオン ( $Fe^{3+}$ ) や海水系地下水に含有する金属イオン ( $Mg^{2+}$ ) は、ベントナイト系材料の膨潤・透水性能を大きく劣化 (膨潤圧の低下、透水係数の上昇) させる要因になり得るため、これら陽イオンの存在にも十分注意する必要があると結論付けた。

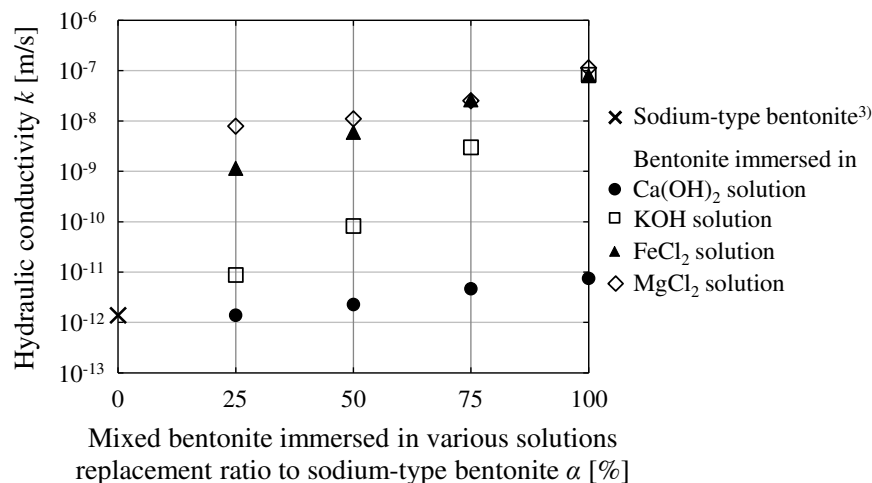


図-3 変質ベントナイト混合率と透水係数の関係 (図中の文献<sup>3)</sup>は、Kohno et al., Clay Minerals (2018)) (材料, Vol.71, No.4, pp.395-401, 2022)

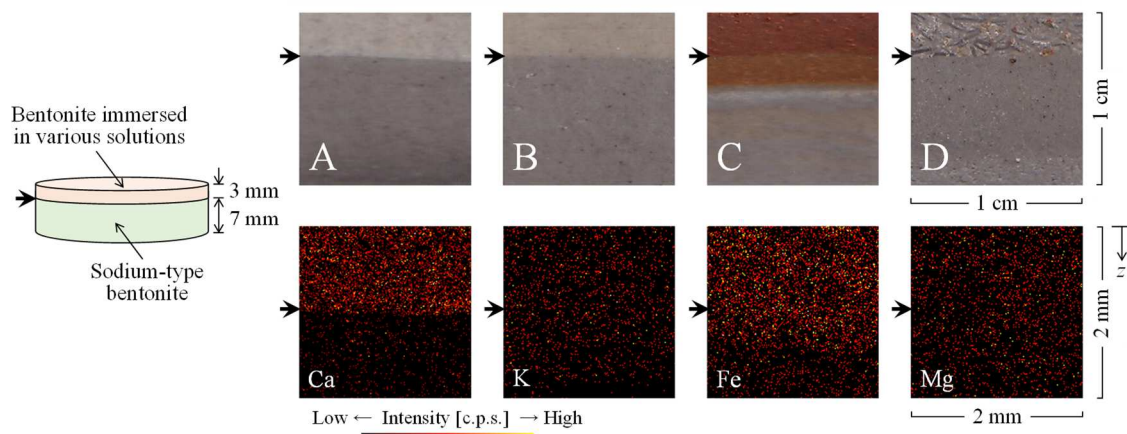


図-4 変質ベントナイトの元素マッピング (材料, Vol.71, No.4, pp.395-401, 2022)

(3) 低透水性岩石供試体に適用できるような定水位型透水試験装置の製作を試みた。次に、封圧 1~12 MPa 下における種々のインタクトな岩石供試体 (直径 50 mm, 高さ 40 mm) の透水係数を測定した。さらに、封圧の上昇に伴い透水係数がどのように変化するかについて、既往の研究結果と比較して整合性を確認することで、試験装置の有用性について確認した。その結果、3本の稲田花崗岩供試体の透水係数と既往の研究におけるトランジェントパルス法による稲田花崗岩の透水係数とを比較すると、封圧の増加に伴う透水係数の低下傾向が類似していることに加えて、透水係数の値も同一の封圧下では同程度であった (図-5)。したがって、本研究で製作した定水位型透水試験装置を用いた手法でも、確立された信頼性の高いトランジェントパルス法と同様に低透水性岩石の透水性を評価することが十分可能であると結論付けた。

作製した定水位型透水試験装置を用いて、巨視き裂に各種粘土鉱物 (スメクタイト、カオリナイト、緑泥石、雲母粘土鉱物) を充填した稲田花崗岩供試体の透水性を明らかにした (図-6)。その結果、稲田花崗岩の透水性は、割れ目の存在により上昇するものの、割れ目が粘土鉱物で充填されることで低下し、さらに、その低下度合いは、粘土鉱物の種類によって異なる結論付けた。今後、充填鉱物を変質させたベントナイトで検討する必要がある。

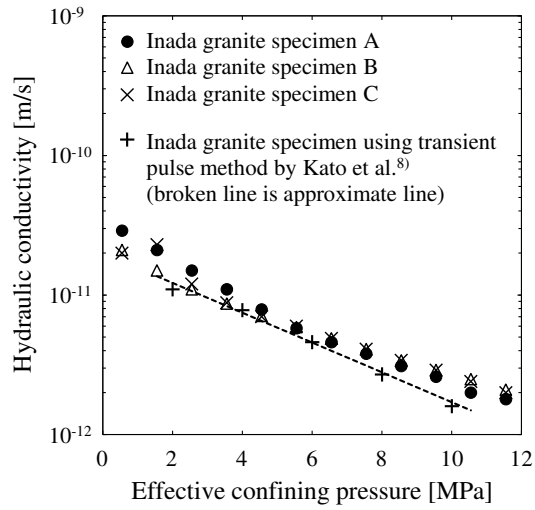


図-5 定水位型透水試験による稲田花崗岩供試体の透水係数とトランジェントパルス法による透水係数との比較 (図中の文献<sup>8)</sup>は、加藤ほか, Journal of MMIJ (2013)) (材料, Vol.71, No.3, pp.221-227, 2022)

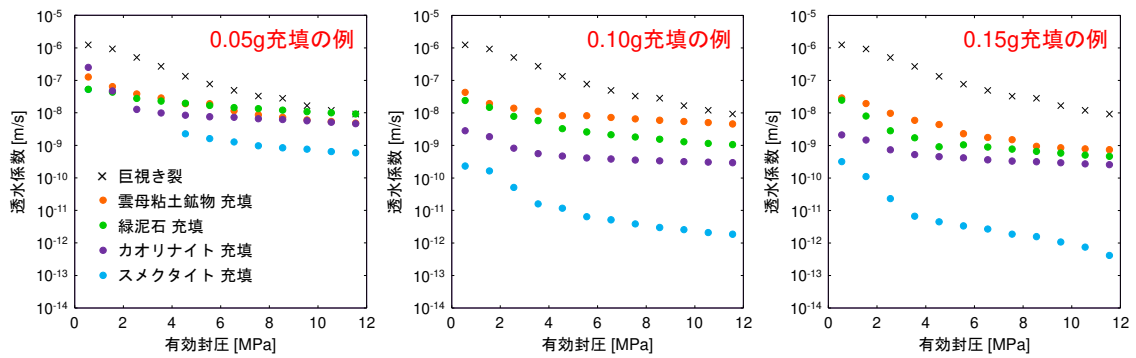


図-6 巨視き裂に各種粘土鉱物を充填した稲田花崗岩の透水係数

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 河野勝宣, 坂田琴美, 浅野匡希, 野波将宏, 小野祐輔, 西村 強	4. 巻 71
2. 論文標題 定水位型透水試験装置を用いた種々のインタクトな岩石の透水性評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 221-227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.71.221	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 -
1. 著者名 Masanori KOHNO	4. 巻 62
2. 論文標題 Swelling-pressure and hydraulic conductivity of compacted clays focusing on the clay-mineral type	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 1203-1209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.Z-M2021833	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 -
1. 著者名 Masaji KATO, Yoshitaka NARA, Daisuke FUKUDA, Masanori KOHNO, Toshinori SATO, Tsutomu SATO, Manabu TAKAHASHI	4. 巻 70
2. 論文標題 Importance of temperature control in surrounding environment during permeability test for measuring hydraulic constants of rock	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 300-306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.70.300	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 -
1. 著者名 河野勝宣	4. 巻 70
2. 論文標題 粘土鉱物の種類に着目した締固めた粘土試料の膨潤圧と透水係数	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 272-278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.70.272	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 -

1. 著者名 Masanori KOHNO	4. 巻 10
2. 論文標題 Effects of hydraulic gradient and clay type on permeability of clay mineral materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 1064
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/min10121064	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 -

1. 著者名 Masanori KOHNO, Yoshitaka NARA, Masaji KATO, Tsuyoshi NISHIMURA	4. 巻 16
2. 論文標題 Evaluation of the mechanical properties of rock materials based on clay mineral type	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of the JSRM	6. 最初と最後の頁 7-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11187/ijjsrm.16.1_7	査読の有無 無
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19件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yoshitaka NARA, Masaji KATO, Tsutomu SATO, Masanori KOHNO, Toshinori SATO
2. 発表標題 Temporal change of permeability in macro-fractured granite by accumulation of fine-grained minerals
3. 学会等名 EGU General Assembly 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masanori KOHNO, Masaki ASANO, Yusuke ONO, Tsuyoshi NISHIMURA
2. 発表標題 Evaluation of permeability of intact rock under confining pressure condition using a constant-head permeability tester
3. 学会等名 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Proceedings of the 11th Asian Rock Mechanics Symposium) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野勝宣, 坂田琴美, 浅野匡希, 小野祐輔, 西村 強
2. 発表標題 地下深部の圧力環境を表現可能な岩石の定水位型透水試験装置の開発
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野匡希, 河野勝宣, 西村 強
2. 発表標題 定水位型透水試験装置を用いたインタクトな岩石の透水性評価
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千光士直人, 河野勝宣, 西村 強
2. 発表標題 変質ベントナイトが岩石き裂充填性と透水性に及ぼす影響
3. 学会等名 第15回岩の力学国内シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田智彦, 河野勝宣, 西村 強
2. 発表標題 乾湿繰り返しによる岩質材料の強度低下に及ぼす含有粘土鉱物の影響
3. 学会等名 第15回岩の力学国内シンポジウム
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 浅野匡希, 河野勝宣, 西村 強, 奈良禎太, 加藤昌治
2. 発表標題 各種粘土鉱物を充填した巨視き裂を含む岩質材料の透水性
3. 学会等名 第15回岩の力学国内シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野勝宣
2. 発表標題 地盤・岩盤材料の物性に及ぼす含有粘土鉱物と変質の影響に関する研究
3. 学会等名 第5回岩の力学に関する若手研究者会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野勝宣
2. 発表標題 含有する粘土鉱物の種類と構造に着目した岩質材料の力学特性評価
3. 学会等名 日本材料学会第239回岩石力学部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野匡希, 河野勝宣, 西村 強
2. 発表標題 粘土鉱物を充填した巨視き裂を含む岩質材料の透水性
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野勝宣, 羽野稜平
2. 発表標題 粘土鉱物の種類に着目した各種粘性土の膨潤圧と透水係数
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野匡希, 河野勝宣, 西村 強
2. 発表標題 巨視き裂を含む岩質材料の透水性に及ぼす充填粘土鉱物種の影響
3. 学会等名 第72回(令和2年度)公益社団法人土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masanori KOHNO and Tsuyoshi NISHIMURA
2. 発表標題 Effect of clay mineral type on the physical and mechanical properties of rock materials
3. 学会等名 ISRM2019 Specialized Conference the 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (YSRM2019&REIF2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshitaka NARA, Masaji KATO, Tsutomu SATO, Masanori KOHNO and Toshinori SATO
2. 発表標題 Permeability measurement for macro-fractured granite using water including clay
3. 学会等名 ISRM2019 Specialized Conference the 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (YSRM2019&REIF2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田智彦, 河野勝宣, 西村 強
2. 発表標題 粘土鉱物を混合した人工軟岩のモード 破壊に関する研究
3. 学会等名 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野勝宣, 内田大貴, 西村 強
2. 発表標題 種々の溶液に浸漬させたベントナイト系材料の透水性に関する研究
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千光士直人, 河野勝宣, 西村 強
2. 発表標題 変質ベントナイトの岩石き裂充填に関する研究
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千光士直人, 河野勝宣, 西村 強
2. 発表標題 種々の溶液に浸漬させたベントナイトの岩石き裂充填に関する研究
3. 学会等名 2019年度(第71回)土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田智彦, 河野勝宣, 西村 強
2. 発表標題 人工軟岩のき裂進展に及ぼす粘土鉱物混合率の影響
3. 学会等名 2019年度(第71回)土木学会中国支部研究発表会
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
---------------------------	-----------------------	----

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