

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2023

課題番号：18K13831

研究課題名（和文）プレート境界デコルマ帯における大規模海底地殻変動メカニズムの解明

研究課題名（英文）The study on the mechanism of ocean crust deformation in decollement zone

研究代表者

杉山 友理（Sugiyama, YURI）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・主任研究官

研究者番号：50803615

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）：本研究は、粘土鉱物の変質と地殻変動の関係について検討し、デコルマ帯における大規模海底地殻変動メカニズムを解明することを研究目的とし、スメクタイトのイライト化により生じる力学特性変化を考慮した力学応答モデルおよび、イライト化に伴う層間水の脱水に起因する力学応答モデルの2種類の数理モデルを提案した。では、変質による抵抗力の増加に伴うプレート間の固着を再現でき、では、デコルマ帯におけるスロースリップを再現することができた。また、解析で初期応力条件の設定時、サンプリング時に生じる間隙水中の溶存ガスの気化は原位置強度の評価に影響を及ぼすため、パラメータ設定には注意が必要であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、今まで理学分野で検討されてきたスロースリップに関する知見に力学的知見を付与し、既往の研究でも得られている粘土鉱物の変質により発生する水圧に加え、プレート沈み込みによるせん断変形を評価することでスロースリップを再現する結果を得た点において学術的意義が高いといえる。また、これまで陸上地盤や水深の浅い海底地盤からのサンプリングではサンプリング時の溶存ガスの状態変化による乱れは無視できるほど小さかったが、水深100mを超えるような大水深からのサンプリングではその影響が無視できないことを明らかにした。これは、洋上風力開発など近年急速に進む海洋空間開発において社会的意義が高いといえる。

研究成果の概要（英文）：To investigate the relationships between clay alteration and large-scale seafloor crust movement in the plate subduction zone decollement, mathematical models were developed to represent smectite illitization. Two types of models were developed in this study: 1. Mechanical modeling considering changes in mechanical properties due to smectite illitization, such as changes in friction characteristics, volume compression, and dilatancy characteristics. 2. Mechanical modeling based on the dehydration of interlayer water in smectite. Using model 1, the increase in shear strength with alteration was successfully expressed, leading to the sticking of the crust. Using model 2, the slow-slip mechanism was successfully explained. Additionally, the results of sampling simulations showed that the gasification of dissolved gas caused an overestimation of in-situ strength. Therefore, it is necessary to set the initial stress conditions considering the disturbance of the sampling specimen.

研究分野：地盤工学

キーワード：粘土鉱物 変質 数理モデル デコルマ帯 スロースリップ

## 1. 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震で発生したような巨大地震津波に繋がるスロースリップと呼ばれる大規模海底地殻変動が生じる原因の一つに“水”が大きく関係しているといわれている。その水が地殻変動を引き起こす要因として、スメクタイトからイライトへ、岩石の成分が変化し、地震を引き起こしやすくなるという化学的要因が挙げられる。実際に南海トラフ等の付加体では、プレート境界沈み込み帯浅部(デコルマ帯)の上層にスメクタイト族の粘土鉱物(モンモリロナイト)、下層にはイライトが見出された。また、沈み込みに伴い地温勾配に従って温度が上昇し、デコルマ帯の存在深度における温度が、スメクタイトが脱水を経験する温度にほぼ対応することが知られている。つまり、スメクタイトが脱水を起こしてイライトに変質することによって不安定な挙動をとり、脱水メカニズムがスロースリップの原因になっていると推定している。この考え方は、地震津波発生領域の広域的普遍性を説明しようとして広く受け入れられてきたが、変質しながらせん断力を受けるデコルマ帯の力学的挙動が考慮されていないという点において解決すべき問題が残されている。

## 2. 研究の目的

本来プレート間の固着がなく、滑り現象が観測されないはずの領域であるデコルマ帯において観測されるスロースリップの発生メカニズムに力学的にアプローチするためには、地質学や地球物理学と、地盤工学の融合が必要である。本研究では、スメクタイトのイライト化に伴う力学特性変化の理論化を試み、提案した数理モデルを用いた数値シミュレーションを行うことで、デコルマ帯におけるスロースリップ発生メカニズムについて解明することを目的とする。また、数値解析によりデコルマ帯の力学挙動についてアプローチする際、デコルマ帯における初期応力状態および強度の把握が重要である。デコルマ帯付近からの採取試料を用いた実験結果を参考にする場合、実験結果はサンプリング時の乱れによる影響を受けている可能性があることから、実験結果を正確に評価するため、海底地盤からのサンプリングから室内試験に至る過程をシミュレートし、採取試料の乱れが室内試験結果に及ぼす影響についての検討も実施した。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の項目について研究を行った。

### (1) スメクタイトのイライト化に関する数理モデルの提案

変質作用の一種であるスメクタイトのイライト化に伴う脱水及び力学特性変化が最も重要であると考えられていることから、変質作用としてスメクタイトのイライト化に伴う脱水による土骨格構造変化、摩擦特性変化及びダイレイタンシー特性変化を表現できる数理モデルを提案し、土/水/気体連成問題として整理した。

### (2) プレート沈み込みシミュレーション

構築した数理モデルを用いてプレート沈み込みを想定したシミュレーションを実施し、得られた力学挙動からスメクタイトのイライト化とスロースリップの関係性について検討した。

### (3) サンプリング時の乱れの検討

原位置からの採取試料を用いた実験結果を参考にする場合、試料採取時の乱れが室内試験結果に及ぼす影響を考慮する必要がある。そこで、海底地盤からのサンプリングから室内試験に至る過程をシミュレートし、採取試料の乱れが室内試験結果に及ぼす影響について明らかにした。

## 4. 研究成果

### (1) スメクタイトのイライト化に関する数理モデルの提案

調査データ、掘削試料を用いた実験結果及び粘土鉱物の変質作用についての地質学や地球物理学分野の知見を積極的に取り入れ、変質を考慮した数理モデルの提案を行い、それを有限要素法に組み込んだ。具体的には、以下の2点に着目し、それぞれモデル化を行った。

#### 1. スメクタイトのイライト化により生じる力学特性変化を考慮した力学応答モデル

変質による力学特性変化(①摩擦特性変化、②体積圧縮特性変化、③ダイレイタンシー特性変化)についてモデル化を行った。

##### ① 摩擦特性変化

既往の研究より、イライト含有率が増えるほど摩擦係数が大きくなり、せん断強度が大きくなることが分かっている。本研究では、摩擦特性の変化を強度定数の変化で表現する。変質による強度定数の変化率を $\alpha_s$ ( $0 \leq \alpha_s \leq 1$ )と定義し、以下のように強度定数の変化をモデル化する。

$$M(\alpha_s) = (1 - \alpha_s) M_{Sme} + \alpha_s M_{Ill} \quad (1)$$

ここで、 $M_{Sme}$  : スメクタイトの強度定数、 $M_{Ill}$  : イライトの強度定数とする。

##### ② 体積圧縮特性変化

図-1 にスメクタイトとイライトの体積圧縮特性の模式図を示す。図-1 より、スメクタイトは、圧縮時と、除荷・再載荷時の体積圧縮特性が同じことから、圧縮指数 $\lambda$ と、膨潤指数 $\kappa$ が同じ値になると考えられる。イライトは、圧縮時と、除荷・再載荷時に体積圧縮特性が異なることから、 $\lambda > \kappa$ であることが分かる。本研究では、変質前後で圧縮指数は一定であると仮定し、

変質前のスメクタイトの膨潤指数を圧縮指数と等しいと考えることで、弾性的な体積圧縮特性を表現した。圧縮指数の変化率を  $\alpha_c (0 \leq \alpha_c \leq 1)$  とし、変質に伴う膨潤指数変化式を以下のように定義した。

$$\kappa(\alpha_c) = (1 - \alpha_c)\kappa_{Sme} + \alpha_c\kappa_{Ill} \quad (2)$$

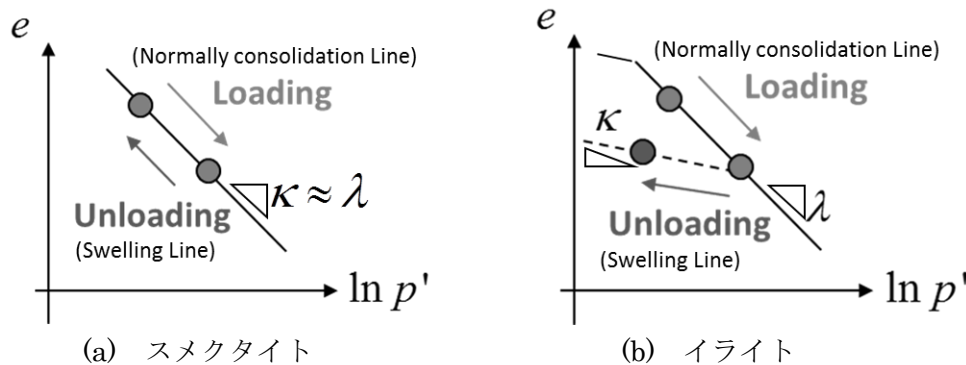


図-1 体積圧縮特性変化

③ ダイレイタンシー特性変化

非排水せん断試験結果から、スメクタイトはせん断による体積変化を示さない、すなわちダイレイタンシー特性を有さないことが分かっている。これらのことから、スメクタイトがイライトに変質するに伴い、ダイレイタンシー特性が徐々に発現すると考えられる。ダイレイタンシー特性は粒状性材料で見られるせん断に伴う非可逆的体積変化であり、Cam-Clay 理論に基づくダイレイタンシー発現の研究成果より、せん断応力比と体積変化の割合を表すダイレイタンシー係数  $D$  は次のように表される。

$$D = (\lambda - \kappa) / (1 - e_0) M \quad (3)$$

ここに、 $D$  : ダイレイタンシー係数、 $e_0$  : 初期空隙比、 $\lambda$  : 圧縮指数、 $\kappa$  : 膨潤指数である。式(3)から、 $\lambda = \kappa$  とすれば  $D = 0$  となり、ダイレイタンシー特性が発現しなくなることになる。つまり、膨潤指数を変化させることで、自ずとダイレイタンシー特性が発現することになる。

①～③を Cam-Clay モデルに導入し拡張することによってスメクタイトのイライト化を表現可能な弾塑性構成モデルを提案した。

2. イライト化に伴う層間水の脱水に起因する力学応答モデル

スメクタイトは層間水を有し、この層間水が脱水してカリウムイオンに置換されることでイライト化することが分かっている。層間水は、水分子同士が結合して1～3層の水分子層として層間に存在し、水分子層数が少ないほど粒子骨格との結合エネルギーが大きく、空隙水よりも高密度状態で存在することになる。そのため、層間水の脱水により生じる土骨格の体積変化と空隙の体積変化は一对一ではなく、土骨格の体積変化よりも空隙の体積変化が大きくなる。ここでは、デコルマ帯に豊富に含まれるスメクタイトの結晶層間に存在する層間水に注目し、スメクタイトがイライトへ変質する過程での層間水の脱水に起因する力学応答を記述するモデルを構築した(図-2)。層間水の体積割合を示す指標として次の層間水比を定義する。

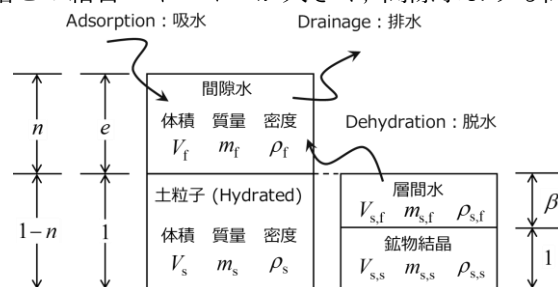


図-2 層間水の脱水に起因する力学応答モデル

$$\beta = \frac{V_{s,f}}{V_{s,s}} \quad (4)$$

層間水比は、脱水に伴って単調に減少する変数である。鉱物結晶と層間水からなる固体部の土粒子密度は次式で表される。

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{m_{s,s} + m_{s,f}}{V_{s,s} + V_{s,f}} = \frac{\rho_{s,s} + \rho_{s,f}\beta}{1 + \beta} \quad (5)$$

上式から明らかなように、土粒子密度は層間水比の関数であり、脱水に伴って変化する。式(5)を用いて土粒子密度を算出するためには、鉱物結晶の密度  $\rho_{s,s}$  と層間水の密度  $\rho_{s,f}$  が必要となる。本章では、鉱物結晶の密度  $\rho_{s,s}$  は、層間水が脱水したイライトの土粒子密度と等価であるとする。鉱物学データベースによると、イライトの土粒子密度は 2.75～2.80 Mg/m<sup>3</sup> であることから、 $\rho_{s,s} = 2.80$  Mg/m<sup>3</sup> とする。一方、層間水の密度  $\rho_{s,f}$  は、層間に含まれる水分子の数によって変化する

ることが知られている。ここでは、既往の研究結果を参考に層間水の密度と層間の水分子数を関連付けた、式(5)を用いて層間水の脱水に起因する土粒子密度の変化を考慮した連続条件式を導出した。非排水条件下での体積変化シミュレーション結果を図-3に示す。非排水条件下での応答として、層間水の脱水に伴う諸量の変化を示したが、等体積条件で変質が生じるとすれば、図-7において発生する体積増加分 $\Delta V = V - V_i$ だけ、要素から排水が生じるはずであり、デコルマ帯での水の供給源としての振舞いと整合的である。

## (2) プレート沈み込みシミュレーション

### 1. スメクタイトのイライト化により生じる力学特性変化を考慮した力学応答モデル

スメクタイトからイライトに変質しながら、プレート沈み込みによるせん断力を受ける粘土鉱物の力学挙動について検討した。解析により得られた過剰間隙水圧の時間変化を図-4に示す。図中の点線は変質終了時である。図-4より、変質が終了する100年までの間に、過剰間隙水圧が50MPa発生することが分かる。DONETを用いた長年にわたる南海トラフ周辺の間隙水圧変化の計測結果から、過剰間隙水圧の発生と海底地殻変動が密接に関係していることが分かっている。これらのことから、本解析結果から得られた間隙水圧変化は、観測データに一致する傾向を示したといえる。次に、応力-変位関係を図-5に示す。図には変質を考慮しない純粋なスメクタイトを用いたシミュレーション結果を比較のため載せている。これらの結果から、スメクタイトが変質することで、せん断に対する抵抗力が増加する結果を得た。

スメクタイトのイライト化に伴う力学特性変化をモデル化することで、変質に伴いせん断に対する抵抗力の増加を表現することができた。せん断抵抗を發揮する際にひずみの蓄積が生じることから、変質による抵抗力の増加はプレート間の固着に繋がるといえる。また、応力-変位関係で若干軟化する力学挙動が得られたことについて、軟化が生じることでプレート間の固着の程度が弱くなると考えると、軟化時にスロースリップが生じる可能性があるといえる。しかし、本章で得られた解析結果では、僅かに軟化した後、大きな残留強度で一定となったことから、スロースリップを表す力学挙動を得ることはできなかった。

### 2. イライト化に伴う層間水の脱水に起因する力学応答モデル

模擬デコルマ帯の変質・せん断変形モデルおよびシミュレーションで得られた模擬デコルマ帯の(a)間隙水圧分布、(b)せん断ひずみ分布の変化をそれぞれ図-6、7に示す。せん断過程では、模擬デコルマ帯にせん断応力 $\sigma_{12} = 10 \text{ kPa}$ が作用し、正規圧密状態からの非排水せん断であることから、一様に過剰間隙水圧が発生する。また、せん断ひずみ $\varepsilon_{12}$ の発生も同様である。その後、変質過程に入ると、変質領域での層間水の脱水とそれに伴う間隙水圧の上昇が生じるが、前節と同じく、未変質領域への水圧の伝播が同時に起こる。変質過程の終了時には、模擬デコルマ帯

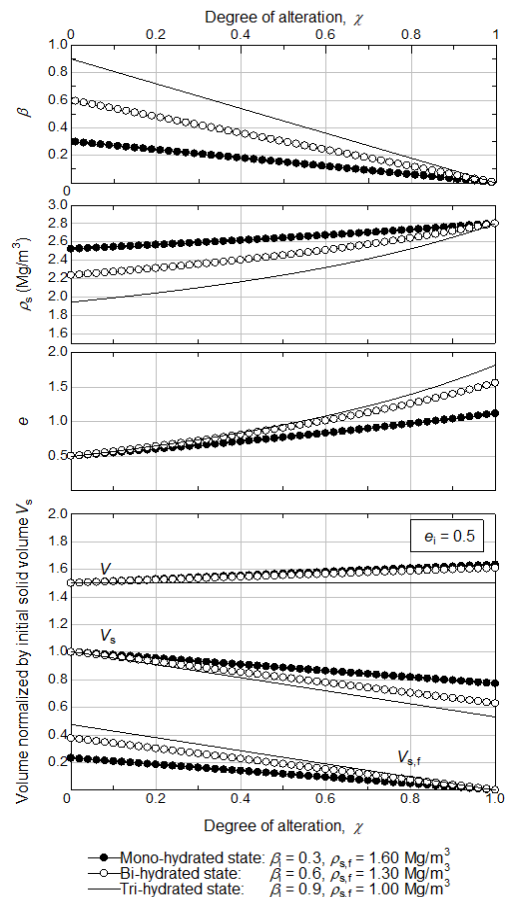


図-3 非排水条件下での体積変化シミュレーション結果

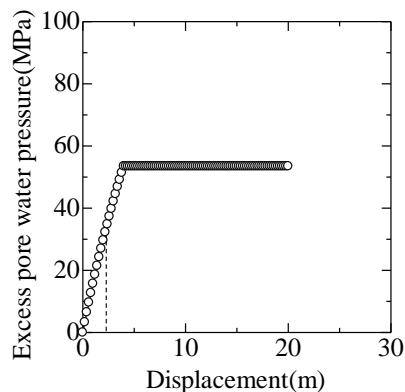


図-4 過剰間隙水圧の時間変化

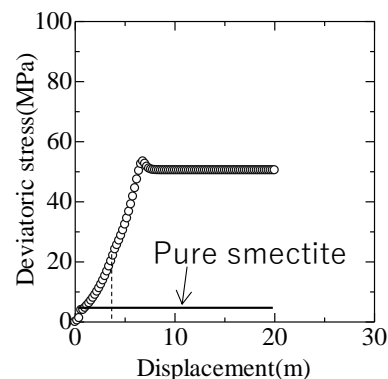


図-5 応力-変位関係

の全域には至らないが、変質領域から離れた広域にまで間隙水圧が伝播している。変質過程終了時には、主として変質領域にせん断ひずみが発生するが、未変質領域に占めるせん断ひずみ発生領域は間隙水圧が伝播する領域ほど広域ではない。変質過程が終了した後、模擬デコルマ帯の間隙水圧が一様になるまでの放置過程に入る。放置過程では、間隙水圧の伝播・消散によって、模擬デコルマ帯の右領域は間隙水圧の増加、変質領域を含む左領域は間隙水圧の低下を呈する。

このシミュレーションで示した模擬デコルマ帯のせん断変形の発生は、層間水の脱水に伴う間隙水圧の上昇に因ることから、その発生速度が変質の速度に依存する。また、間隙水圧の伝播・消散によってもせん断変形は生じ、その発生速度は透水係数が支配する。いずれも比較的長い時間を経て生起する現象であり、せん断応力の作用によって間もなく生じるせん断変形の発生よりも「ゆっくり」である。非常に単純な条件の下で模擬されたデコルマ帯を対象としたシミュレーションを通して、構築したモデルがデコルマ帯に生起する様々な現象を複合的に説明し得るものであることを確認できた。

### (3) サンプリング時の乱れの検討

海底粘土のサンプリングは、原地盤にサンプラーを押し込み、水面まで引き上げ、その後サンプラーから試料を採り出すことになる。軟らかい粘性土の乱さない試料採取には、最も信頼度の高いサンプラーであることから、固定ピストン式シンウォールチューブサンプラー(直径 75mm, 長さ 1.0m)が広く用いられている。本研究では、サンプラーの引き上げに伴う水圧低下過程を Process 1, サンプラーから試料を切り出す際の応力解放過程を Process 2, 室内試験を Process 3 として、溶存ガスの気化を考慮したサンプリング過程をシミュレートした。図-8, 9 にそれぞれ水深 200m, 海底深度 20~100mbsf からのサンプリング後のチューブ内残留飽和度および有効応力比分布を示す。この結果、サンプリング時の圧力変化に伴い間隙水中の溶存ガスが気化することで採取試料が不飽和化し、不飽和化に伴い試料内部でサクションが作用するため、有効応力が変化し、サンプリングにより試料が過圧密化することが分かった。

一般的にチューブ中央部は試料の乱れが小さいと考えられており、このような試料を用いた試験結果は不攪乱試料の結果として整理されることが多い。しかし海底地盤を対象とする場合、不飽和化の影響を受ける可能性があるため、今までと同様に不攪乱試料とみなすと圧密特性を誤って評価する可能性があることが分かった。また、一軸圧縮試験から得られる非排水強度は原位置強度を誤って評価してしまう可能性があるといえる。

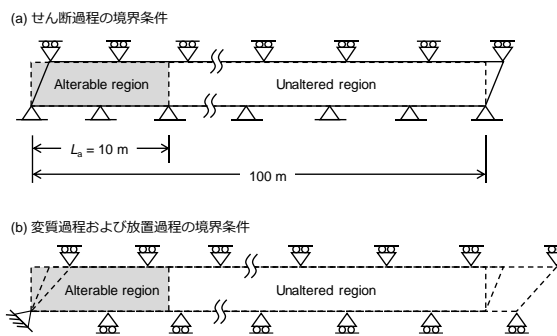


図-6 変質・せん断変形モデル

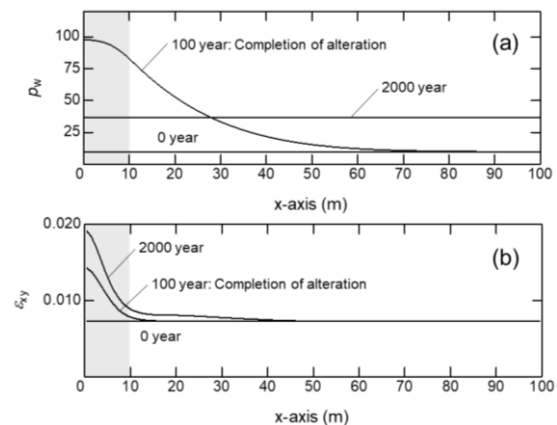


図-7 部分変質シミュレーション結果

(a)間隙水圧, (b)せん断ひずみの分布変化

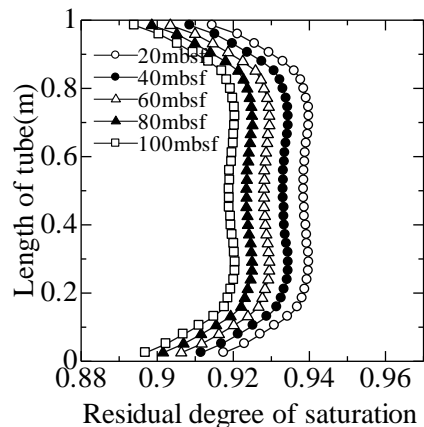


図-8 チューブ内残留飽和度分布

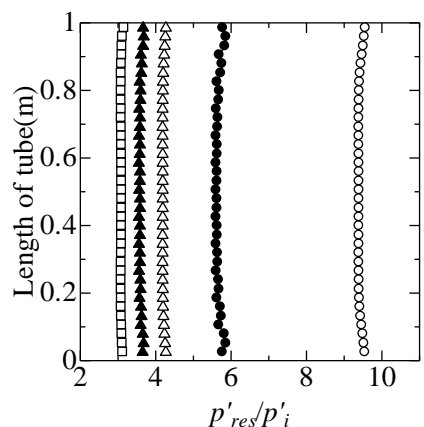


図-9 有効応力変化

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Iizuka Atsushi, Tachibana Shinya, Takeyama Tomohide, Sugiyama Yuri, Nomura Shun, Ohta Hideki	4. 巻 6
2. 論文標題 Extension of unsaturated soil mechanics and its applications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geotechnical Research	6. 最初と最後の頁 156 ~ 176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1680/jgere.18.00004	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 杉山友理, 橘伸也, 森川嘉之	4. 巻 60(1)
2. 論文標題 プレート境界断層デコルマ帯におけるスロースリップ発生メカニズムに関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 港湾空港技術研究所報告	6. 最初と最後の頁 3~29
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 上原 拓真, 飯塚 敦, 橘 伸也, 杉山 友理	4. 巻 23
2. 論文標題 深海底プレート境界デコルマ帯を想定した過圧密化の発現	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 都市安全研究センター研究報告	6. 最初と最後の頁 26-36
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 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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋亮太
2. 発表標題 デコルマ帯での間隙水圧上昇に伴う滑り現象の力学解析
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会地盤工学会
4. 発表年 2023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
---------	---------