

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 20 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01422

研究課題名（和文）細粒土のマイクロメカニクス：メゾスケール構造の定量化と力学特性への影響の解明

研究課題名（英文）Micromechanics of fine grained soil: Quantification of its mesoscale structure and mechanical properties

研究代表者

松島 亘志 (Matsushima, Takashi)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：60251625

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、放射性廃棄物地層処分等でも使用される粘性土に対して、土粒子スケールの観測および数値解析手法を開発し、そこから粘性土の長期的力学特性を評価することを目標とした。研究成果は次の通りである。(1) 湿潤状態の細粒土の粒子堆積構造を観察する手法を明らかにした。(2) 湿潤粘土の圧縮・膨潤試験を実施し、高圧下で複数の板状粘土粒子が凝集し、所々折りたたまれている様子などが観察できた。(3) 板状粘土粒子の圧縮構造特性についての数値解析を行い、圧縮力と粒子堆積構造の関係について有益な知見が得られた。(4) 圧縮により同方向に配向した粘土粒子クラスターの統計的性質を数値解析により明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粒子サイズが小さく、観測が困難である細粒土（特に粘土）の長期的力学特性の評価手法を確立することは、放射性廃棄物地層処分等に関連して工学的に重要であるだけでなく、地盤の形成過程の解明など理学的にも重要である。特に、熱化学反応等の材料変化等に関しては、短い期間の実験結果を外挿して評価しているのが現状である。本研究で実施したような土粒子スケールの観測や数値解析は、材料変化をより直接的に考慮できる可能性があり、今後の学術的・社会的意義は大きいと考えている。

研究成果の概要（英文）：We aimed to develop microscale experimental and numerical methods of clayey soils, which are used in the geological disposal of radioactive waste, to evaluate their long-term mechanical properties. The research findings are as follows: (1) The existing methods for observing the packing structure of clay particles in a wet state were evaluated. (2) A series of compression and swelling tests on wet clay were conducted and observed that multiple platy clay particles aggregated and folded under high pressure. (3) Particle-scale numerical simulations on the compression of platy clay particles were carried out to obtain the useful insights on the relation between compressive force and particle packing structure. (4) The statistical properties of clusters of clay particles aligned in the same direction due to compression were studied using numerical simulations.

研究分野：地盤工学

キーワード：粘土 SEM観察 個別要素法 粒状体 堆積構造

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土木構造物の長期維持管理、地球温暖化に伴い増加傾向にある自然災害に対応する防災計画、生態系維持など環境を考慮した国土計画、放射性廃棄物の地層処分問題など、社会基盤工学において、100年～10,000年に亘る長期間問題への対応が大きな課題となっている。言うまでもなく、長期間問題の難しさの本質は、対応する長期間の実験が実施できないということにある。これまで、様々な化学反応の加速条件下や遠心重力場での各種実験が行われているが、これらはすべての相似則を満足するものではない。それらの限られた実験結果から現象論的なカーブフィッティングを行い、外挿によって長期挙動を推定する、というのが現状のほぼ唯一の手立てである。特に熱化学反応を伴う長期間問題では、比表面積の大きな細粒土からなる地盤が影響を受けやすい。また、地盤の長期沈下や、放射性廃棄物の地層処分におけるベントナイトバリアなど、多くの重要な長期工学問題も細粒土が関わっている。

これまでに様々な分野で行われてきた粒状体力学の研究によって、粒子間付着力のない「砂のような粒状体」に関しては、多くの知見が積み上がってきている。一方で、細粒土のように粒子間付着力のある粒状体に関しては、構造ユニットの同定手法を始めとして、未だ多くの課題がある。粘土のSEM観察では、古くからペッド・ポア構造などのメゾスケール構造の存在が指摘されており(図1)、水銀圧入ポロシメトリー(MIP)などによる検討がなされているが、そのようなメゾスケール構造を3次的に観察し、定量化する手法は未だ確立しておらず、またその力学的な応答との関係もモデル化されていない。一方、粒子ベースの直接数値計算による検討も一部行われている[1-3]が、粘土の付着力は遠距離力であり、多大な計算時間がかかるため、系統的な理解が得られるには至っていない。

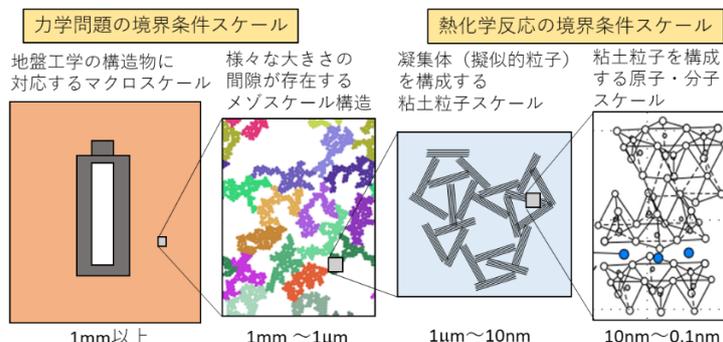


図1 細粒土の空間スケール. 粘土粒子スケールとマクロ(連続体)スケールの間のメゾスケール構造の重要性が指摘されている。

2. 研究の目的

上述のように、粒子破碎や固着などの材料変化を伴う力学問題、100年～10,000年に亘る長期安全性評価など、対応する要素試験の実施が困難な問題に対する、土質力学・地盤工学の予測可能性を向上させるためには、現象の直接的なモデリングが可能である土粒子レベルの振る舞いから土全体の力学挙動を記述する「粒状体のマイクロメカニクス」の考え方が有効である。本研究では特に、粒子サイズが小さく、観測が困難であるとともに、熱化学反応等の材料変化の影響を受けやすい細粒土を対象として、湿潤状態の細粒土のメゾスケール構造を観察する実験および粒子ベース数値解析を行う。その上で、新たに定義するメゾスケール構造ユニットの力学応答を明らかにして、付着性粒状体としての細粒土のマイクロメカニクスの新たな枠組みを構築する。

3. 研究の方法

- (1) 湿潤状態の細粒土のメゾスケール構造を観察する手法として、水中に分散させた粘土を薄膜メンブレンを介して電子顕微鏡にて観察する方法を試みた。
- (2) 様々な含水比を有する湿潤モンモリロナイト粘土を様々な圧縮力で鉛直方向に圧縮し、それらの最終的な乾燥密度や水銀圧入ポロシメトリー(MIP)から圧縮後の空隙の状態を調べた。また、試料の水平方向および鉛直方向断面をFE-SEMにより観察し、異方的な3次元メゾスケール構造を確認した。さらに、それらの試料を再度吸水膨張させ、3軸圧縮試験を実施した。
- (3) 板状粘土粒子の効率的な粒子ベース数値解析を実施するため、粒子間相互作用力モデルの検討を行った。
- (4) 非付着性粒子の圧縮およびせん断挙動の数値解析を行い、粒状体のメゾスケール構造ユニットに及ぼす粒子形状(特に細長度)の影響を調べた。また、その構造ユニットに作用する応力の性質についての検討を行った[4,5]。

4. 研究成果

- (1) 湿潤状態の細粒土のメゾスケール構造観察手法の開発

現在、市販されている A-SEM(Atmospheric SEM)や E-SEM(Environmental SEM)を試みたが、十分な解像度は得られなかった。ここでは、FlowVIEW TeK 社の開発した液中試料観察専用ホルダー(Aquarius)を用いて水中に分散させた粘土を観察した結果を示す。Aquarius では、 $0.02 \times 0.02\text{mm}$ の窓枠に設置された 20nm 厚のメンブレン越しに液浸試料を観察することができる。用いた FE-SEM は SU5000/Hitach Hi-Tech, 加速電圧は 10kV で、分散媒にはイオン交換水を用いた。

図 2 はカオリナイト(ニュージーランドカオリン)の液中観察結果である。これによれば、 $0.2 \sim 3\text{mm}$ 程度の棒状粒子が凝集している様子が観察できる。一方、本手法では圧縮された粘土の状態を観察することができないため、圧縮粘土にイオン液体を浸潤させ、低真空下で直接 SEM 観察した結果を図 3 に示す。低真空下のため、画像はノイズを含んでいるが、液中で凝集した塊と同様の構造が見られた。一方、粒径の小さなモンモリロナイトでは良好な観察結果が得られず、今後の課題となった。

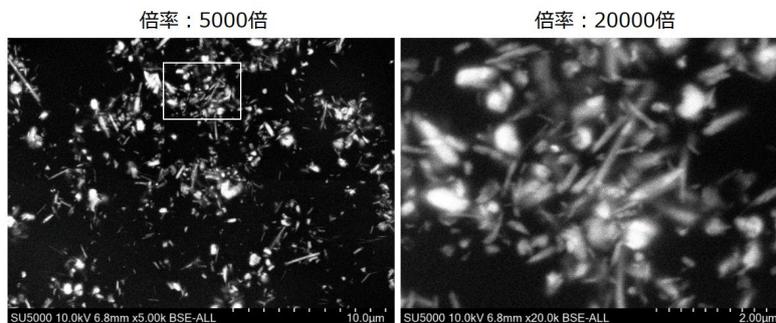


図 2 カオリナイトの液中観察結果

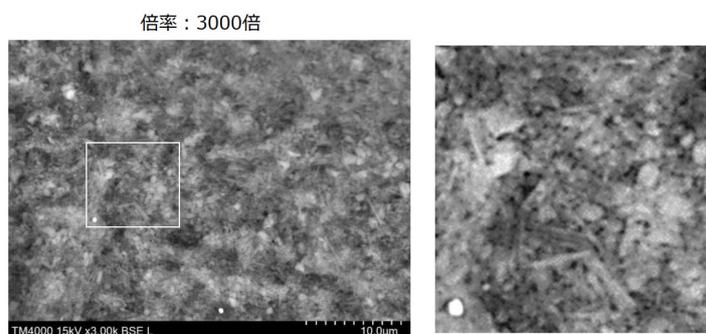


図 3 圧縮粘土にイオン液体を浸潤させ、低真空下で直接 SEM 観察した結果

(2) 湿潤モンモリロナイト粘土の圧縮試験

様々な初期含水比の湿潤モンモリロナイト粘土(Kunipia-F)を様々な圧力で一方向圧縮し、その後乾燥させて乾燥密度を測定した結果を図 4 に示す。モンモリロナイト粒子がポテンシャルバリアを超えて凝集するためには 45MPa 以上の圧力が必要と考えられている。図によれば、高圧下ではあるものの、通常の締固め試験と同様、モンモリロナイト粘土の圧縮でも最適含水比が存在することがわかる。ただし、高圧下では間隙水の圧縮も無視できず、漸近するゼロ空隙曲線が圧力とともに上昇する。

更に図 5 は、含水比 7.9% 、乾燥密度 2.3Mg/m^3 のときの水平及び鉛直断面の SEM 画像であるが、モンモリロナイト粒子が鉛直方向に圧縮され、複数の板状粒子が凝集し、所々折りたたまれていることがわかる。

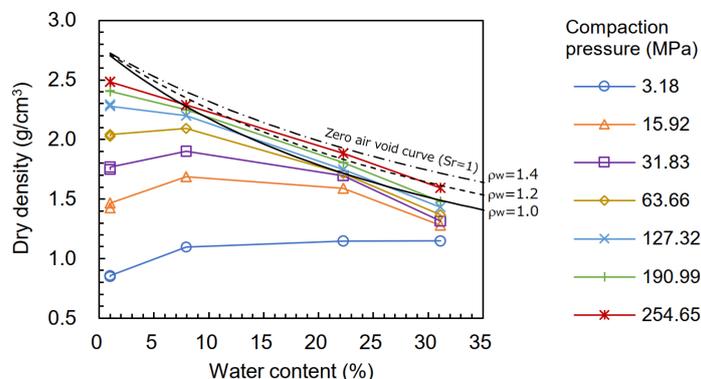


図 4 モンモリロナイト粘土の圧縮後乾燥密度に及ぼす初期含水比と圧縮応力の影響

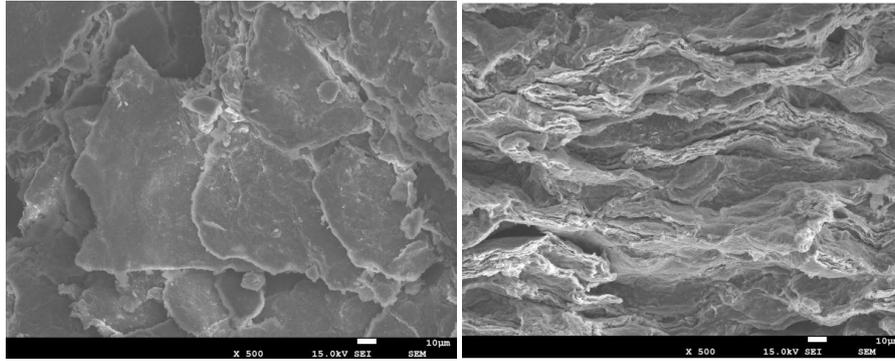


図5 含水比 7.9%, 乾燥密度 2.3Mg/m³ のときの水平及び鉛直断面の SEM 画像

(3) 板状粘土粒子の圧縮構造特性についての 2 次元数値解析

前節のような板状粘土粒子の凝集／圧縮／せん断挙動を調べる目的で、2次元個別要素法 (Discrete Element Method, DEM) による数値解析を行った。用いた解析コードは Suzuki & Matsushima (2014)[3] で用いたものと同じであり、粒子間力としては、粒子間接触点における線形バネ-ダッシュポット-スライダーモデルに加えて、非接触力である vdW 引力および拡散二重層反力を加えたものである。本研究では特に、円形要素を線状に剛接することにより線状粒子をモデル化した。ここで非接触力としては、それぞれの円形要素間で計算されるものをそのまま足し合わせて用いることとしている。

2017 個の線状粒子を $\sigma_c = 1.0 \times 10^{-4}(\text{Pa})$ および $2.0 \times 10^{-4}(\text{Pa})$ で等方圧縮して作成した試料に対して、1次元圧縮試験解析を行う。すなわち、横方向の周期幅を変更せず、縦方向の周期幅を一定速度で減少させ、システムに加わった応力と間隙比の関係を求める。図 6 は、 $\sigma_c = 1.0 \times 10^{-4}(\text{Pa})$ で等方圧縮した試験体の圧縮の様子を示している。

特に(c)のケースの粒子配置を見ると、鉛直方向圧縮により、多くの粒子が水平方向を向いていることがわかる。この粒子配向角分布を示したものが図 7(左)である。これを見ると、初期にはほぼ等方的だった配向角が水平方向に卓越していることが示されている。一方、図 7(右)は接触点の法線方向角分布を示したものであるが、やや鉛直方向に卓越する傾向が見られるものの、その傾向はそれほど顕著ではない。この原因は、粒子が円要素をモデル化しているために、粒子の側面で接触していても粒子配向角と接触角が 90 度とならないことが原因と考えられる。

最後に図 8 は、与えた鉛直方向応力と間隙比の関係図を示している。なお、ここでは線状粒子でなく円粒子で同様に行った解析結果も付け加えている。これによれば、間隙比が 1 以下の部分では直線的な $e\text{-log}(p)$ 関係が見られるが、間隙比が 1 以上の部分では下に凸の曲線となっている。一方、縦軸、横軸ともに対数を取った図では、間隙比が 0.3 程度以上はほぼ直線になっているが、それより小さな間隙比では上に凸の曲線となり、急激に間隙比が減少している。これは粒子間の接触斥力として線形バネモデルを使っていることにより、接触点で不当に大きな食い込みが発生していることが原因であると考えられる。このような食い込みが発生すると、間隙比は負の値となってしまう、現実と対応しない結果となる。ただし、実験での $e\text{-log}(p)$ の微視的メカニズムを知る上では、本解析の結果は重要な示唆を与えるものと考えられる。

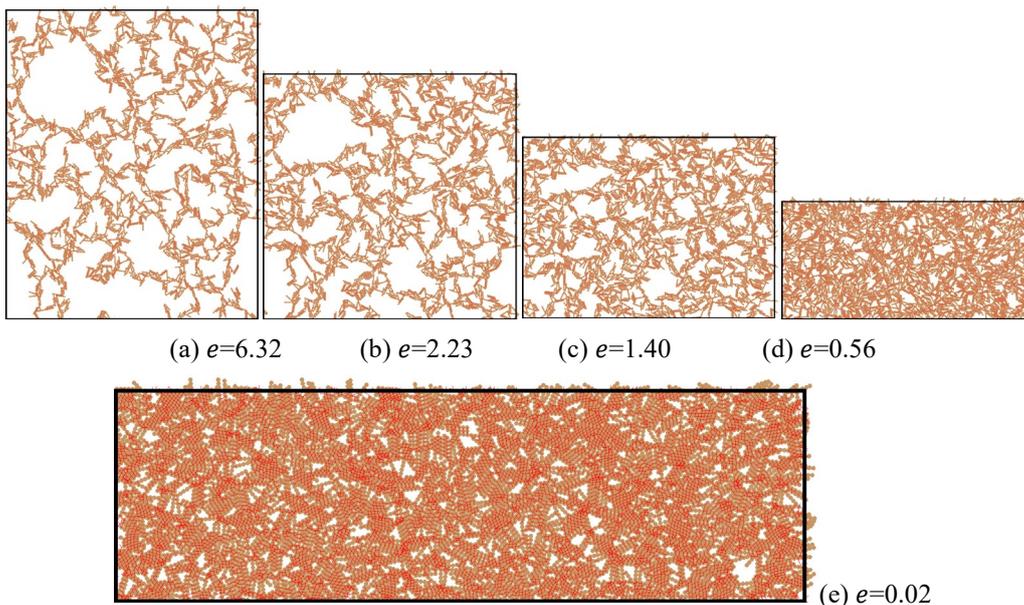


図6 線状粒子の1次元圧縮解析でのスナップショット ($\sigma_c = 1.0 \times 10^{-4}(\text{Pa})$)

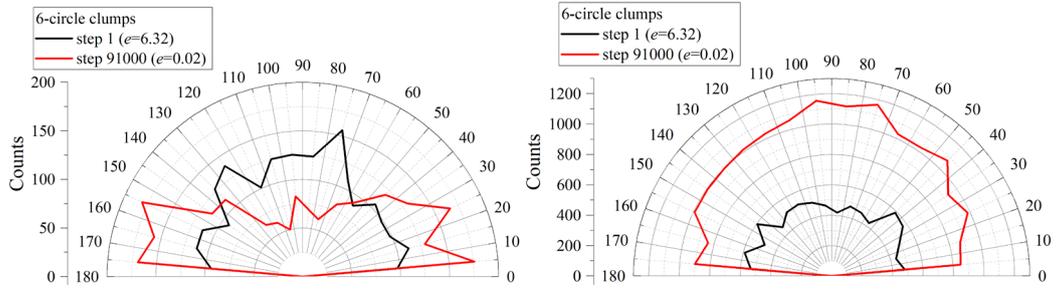


図7 1次元圧縮解析の初期及び変形後の粒子配向角分布(左)および接触点法線方向角分布

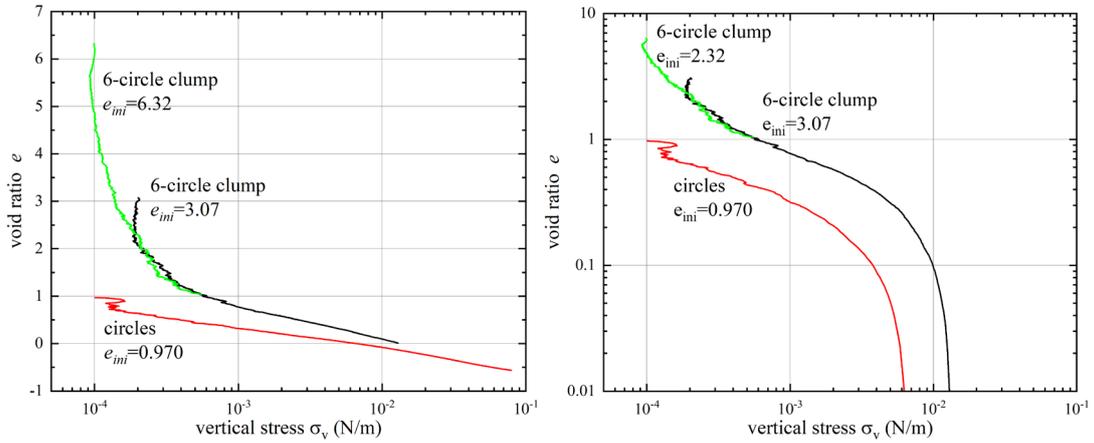


図8 1次元圧縮解析での e - $\log(p)$ 関係(左)および $\log(e)$ - $\log(p)$ 関係(右)

参考文献

- [1] Gilabert, F. A., Roux, J. N., Castellanos, A. (2007). Physical review E, 75(1), 011303.
- [2] Ebrahimi, D. et al. (2014) Journal of Chemical Physics 140 (15), 154309.
- [3] Suzuki, A., Matsushima, T., Meso-scale structural characteristics of clay deposit studied by 2D Discrete Element Method, Proc. IS-Cambridge, *Geomechanics from Micro to Macro*, Soga et al. Eds, Taylor & Francis, ISBN 978-1-138-02707-7, 33-40, 2014.
- [4] Jiang, X., Matsushima, T. (2020). Void cell structural characteristics of elliptical granular pack, 日本流体力学会年会論文集, 4p.
- [5] Jiang, X, Matsushima, T., Blumenfeld, R. Structural characteristics of ordered clusters in packs of ellipses, EPJ Web of Conferences. Vol. 249. EDP Sciences, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 JIANG Haoran, JIANG Xiaoyu, MATSUSHIMA Takashi	4. 巻 11
2. 論文標題 RHEOLOGY OF SEGREGATED BI-DISPERSE GRANULAR FLOW IN AN INCLINED PLANE	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/journalofjsce.22-15035	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 Tsuchiyama Akira, Sakurama Takashi, Nakano Tsukasa, Uesugi Kentaro, Ohtake Makiko, Matsushima Takashi, Terakado Kazuo, Galimov Erik M.	4. 巻 74
2. 論文標題 Three-dimensional shape distribution of lunar regolith particles collected by the Apollo and Luna programs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-022-01737-9	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 Jiang, H., Kawamoto, R., Matsushima, T.	4. 巻 1
2. 論文標題 Shape effects on shear behavior of superdisk systems studied by level set discrete element method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. 6th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE-2022)	6. 最初と最後の頁 -
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 該当する
1. 著者名 Watanabe Yasutaka, Yokoyama Shingo	4. 巻 62
2. 論文標題 Effects of alteration on shear characteristics of compacted Ca-bentonite immersed in alkaline solutions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 101199 ~ 101199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2022.101199	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 Watanabe Yasutaka, Yokoyama Shingo, Shimbashi Misato, Yamamoto Yoichi, Goto Takahiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Saturated hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures before and after gas migration in artificial seawater	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering	6. 最初と最後の頁 216 ~ 226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jrmge.2022.01.015	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 Fukushima Yo, Higo Yosuke, Matsushima Takashi, Otake Yu	4. 巻 16
2. 論文標題 Liquid bridge contribution to shear behavior of unsaturated soil: modeling and application to a micromechanics model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Geotechnica	6. 最初と最後の頁 2693 ~ 2711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11440-021-01263-0	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 Huang Quanshui, Ma Gang, Matsushima Takashi, Zhou Wei, Lin Mingchun	4. 巻 61
2. 論文標題 Effect of disordered pore distribution on the fracture of brittle porous media studied by bonded DEM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1003 ~ 1017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2021.05.005	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 該当する

1. 著者名 JIANG Xiaoyu, MATSUSHIMA Takashi	4. 巻 77
2. 論文標題 RHEOLOGICAL AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS IN GRANULAR SHEAR FLOW OF 2D ELLIPTICAL PARTICLES	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_297 ~ I_305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_297	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 OTA Masahiro、WATANABE Takuya、MATSUSHIMA Takashi	4. 巻 77
2. 論文標題 MELTING AND SOLIDIFICATION EXPERIMENT OF LUNAR SOIL SIMULANT, FJS-1 BY ISOTROPIC AND SURFACE HEATING	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_319 ~ I_328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_319	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 KONO Akiko、MATSUSHIMA Takashi	4. 巻 77
2. 論文標題 QUANTITATIVE EVALUATION OF ESTIMATED RESIDUAL SETTLEMENT OF POORLY-GRADED CRUSHED STONE LAYERS BY USING DEM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_339 ~ I_348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_339	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 Jiang Xiaoyu、Matsushima Takashi、Blumenfeld Raphael	4. 巻 249
2. 論文標題 Structural characteristics of ordered clusters in packs of ellipses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 06004 ~ 06004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202124906004	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 該当する

1. 著者名 Matsushima Takashi、Blumenfeld Raphael	4. 巻 249
2. 論文標題 Statistical properties of cell stresses in 2D granular solids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 02006 ~ 02006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202124902006	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 該当する

1. 著者名 Watanabe Yasutaka, Tanaka Yukihiisa	4. 巻 1
2. 論文標題 Swelling pressure of compacted bentonite acting on constraining material with deformability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geotechnique	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1680/jgeot.20.P.348	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 Watanabe, Y., Yokoyama, S.	4. 巻 9(2)
2. 論文標題 Shear characteristics of compacted bentonites immersed in KOH and KOH-NaOH solutions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Geotechnical Society Special Publication	6. 最初と最後の頁 8~13
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 -

[学会発表] 計3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 T. Matsushima, Y. Higo, Y. Otake
2. 発表標題 4-cell analogical model to describe plastic shear behavior of granular solid
3. 学会等名 International Conference on Nonlinear Solid Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Matsushima, T., Higo, Y., Otake, Y.
2. 発表標題 4-cell analogical model to describe plastic shear behavior of granular geomaterials
3. 学会等名 Alear Geomaterial workshop (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Matsushima
2. 発表標題 Post Liquefaction Behavior: as a Complex Grain-Water Interaction
3. 学会等名 ISBEC2023 (Interdisciplinary symposium on the development of bioresource engineering based on the analysis of colloid aggregation and electrokinetic phenomena) (国際学会)
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
研究分担者	渡邊 保貴 (Watanabe Yasutaka) (80715186)	一般財団法人電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部・主任研究員 (82641)	

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