

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03815

研究課題名(和文)実スケール数値砂箱実験による付加体内部3次元応力場の解明

研究課題名(英文)Stress state in accretionary prisms from the real-scale numerical sand-box experiment

研究代表者

古市 幹人(Furuichi, Mikito)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門(数理科学・先端技術研究開発センター)・グループリーダー

研究者番号：50415981

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、大規模DEMシミュレーションを用いて付加体の構造発達を模擬し、テクトニクスにおける粒状体の役割を探るものである。実スケールの数値砂箱実験では、断層形成時にアーチ状の応力鎖が自発的に形成され、波構造が発達することを発見した。これは、地殻変形が地質学スケールの不均質だけでなく、微視的な不均質からも生じ得ることを示唆した。また、粘着力を加えた数値岩石箱シミュレーションでは、付加体特有の断層構造が再現され、粘着力のヒーリングが断層発達に大きな影響を与えることが明らかになった。さらに、地震波を伴う破壊的な要素運動を再現し、その波動伝播速度や断層破壊速度が現実と整合する結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

付加体内部の応力状態を理解することは、地震発生や日本列島の成り立ちを解明する重要な手がかりとなります。そこで、付加体的な構造発達を大規模粒状体シミュレーションを用いて研究しました。そして、断層形状の初期発達において、断層形成時に粒子が集団運動を介してアーチ状の応力構造を自発的に形成することで、断層が水平方向に湾曲することを発見しました。この結果は、大域的な断層の湾曲が、従来議論されてきた海山やプレート運動といった地質学スケールの不均質性だけでなく、地殻に内在する微視的な不均質が集団運動を介して現れる巨視的な変形、つまりスケールをまたいだ地殻の変形プロセスにも起因し得ることを示唆しています。

研究成果の概要(英文)：In this study, large-scale DEM simulations were used to model the structural evolution of the accretionary wedge and to investigate the role of granularity in tectonics. In real-scale numerical sandbox experiments, we found that arcuate stress chains spontaneously formed during faulting and undulation structures developed. This suggests that crustal deformation can arise not only from geological-scale heterogeneities, but also from microscopic heterogeneities. In addition, in numerical rock-box simulations with added cohesive forces, we successfully reproduced the fault structures characteristic of an accretionary wedge and found that the healing of cohesive forces significantly influences fault development. Furthermore, our simulation showed fast element motions that generate elastic waves, and obtained results that showed reasonable behavior in terms of wave propagation and fault rupture velocities of seismic event.

研究分野：固体地球科学

キーワード：DEM 付加体 大規模計算 応力鎖 地質構造発達 SHmax

### 1. 研究開始当初の背景

付加体中の応力状態を理解する事は、地震発生過程や日本列島の成り立ちを解明する重要な手がかりとなる。地域により異なる形状や物理探査の調査結果は、付加体内の力学場が3次元的事であることを強く示唆する。しかし、観測・測地に基づくアプローチだけでは情報量に限界があり、海溝軸方向も含めた付加体発達の全体像を把握する事が困難である。このような状況にあって、室内砂箱実験は付加体の3次元発達過程を推定する有効手段となる。粉状体としての砂は、地殻が示す複雑なレオロジーの多くの特徴 (Mohr-Coulomb の破壊基準、Dilation や弱化) を捉えるため、構造地質学や資源探査などを目的とした地質解析において、その短縮変形を付加体形成のアナログモデルとみなした研究が多くなされてきた。ただし欠点として、室内実験では粉体層内部の挙動を観測することが難しい。X線や音響センサー等の技術開発も進んできたとはいえ、いまだに3次元的な粒子挙動を詳細に解析することは困難である。この事実は、地質学スケールでの3次元的な構造発達の理解において大きな妨げとなっていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、室内砂箱実験を模擬した個別要素法 (DEM) 数値シミュレーションを実施し、詳細な粒状体解析を行う事で、室内砂箱実験では露にすることが困難な、3次元的な構造発達、ならびに内部構造および応力状態を数値的に解析することで、付加体内部の3次元の内部応力状態とその形成過程の解明に取り組むことに挑戦した (図1)。さらにモデルを進展させて、岩石の破壊挙動を模擬するために、新しいDEM計算モデルの開発も研究目的であった。

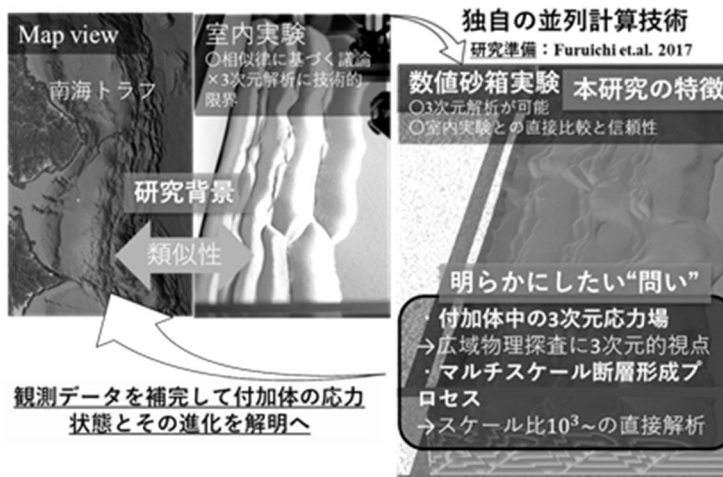


図1. 研究概念図

### 3. 研究の方法

研究の前半においては、海洋プレートの沈み込みに伴う陸側の付加体形成を模擬するために、箱の中に粉体層を敷き詰め、移動壁により短縮変形する数値実験を行った。室内砂箱実験の直接シミュレーションであることが特徴であり、約0.2 mmの要素を(1 m \* 1 m \* 2 cm)の領域に対して約24億粒子敷き詰めた数値計算となる。このような大規模DEM計算は、我々が近年開発した独自のDEMコードを使用する事で可能になったことであり、世界に先駆けた大規模DEMシミュレーション研究となった[1]。また、粒状体中の応力鎖解析では、大きな接触力を担い巨視的な変形をコントロールする粒子群を抽出する事で、その挙動を粉体物理の知見に基づき解釈することが出来た。このような大規模粒状体解析も本研究の特徴となる。また研究後半においては、数値砂箱実験モデルを進展させ、個別要素間に粘着力を導入して岩石挙動を模擬した計算を実施した。その際に粘着力モデルのキャリブレーションとして数値3軸圧縮実験も実施した。この計算においては、特に粘着力のヒーリングの有無が地質学スケールのモデルとしてパラメータ化し、その構造発達における断層幾何パターンに与える影響について、調査を実施した。

### 4. 研究成果

研究の前半のハイライトは、数値砂箱実験の短縮方向と垂直な方向(海溝軸方向)に応力のアーチ構造が自発的に形成されることで断層が湾曲する事を発見し、そのメカニズムを解明した事が挙げられる[Furuichi et al. 2018]。図2(a)のように、初期に均質に設置した粒状体層の短縮計算において、短縮方向と垂直な水平軸の方向に湾曲する断層形状が再現できる。日本周辺の付加体においても同様の湾曲構造が確認されており、海山や異なる岩盤性状のプレート沈み込みなどが作業仮説として検討されることが多いが、その成因は不明である。そこで、応力鎖解析によってこの構造の詳細に調べたところ、断層形成時に粒子が集団運動を介してアーチ状の応力構造を自発的に形成し、そのアーチに沿って断層が湾曲することを発見した(図2(b))。また、その裏付けとなる力のバランスを考慮した理論モデルとの定量的な比較検証に成功し、アーチ構造のサイズを決める要因が、主に粒状体層の摩擦角と層厚、つまり地盤の破壊挙動と幾何であることが分かった。この結果は、付加体の海溝軸方向への湾曲が、従来議論されてきた海山やプレート運動といった地質学スケールの不均質性だけでなく、地殻に内在する微視的な不均質が

集団運動を介して現れる巨視的な変形、つまりスケールをまたいだ地殻の変形プロセスにも起因し得ることを示唆しており、将来それらを地盤の力学試験と構造探査から確かめることが出来るかもしれない。さらに、実際の観測における本解析結果の有用性を議論するために、シミュレーションの中で仮想の掘削杭を設定し、SHmax がどのように測定されるのかを、異なる深さにおいて調査した。アーチ型応力の外側での一般的な掘削杭では、SHmax の方向は深さにあまり依存せず、地域的な断層運動の長期活動変化に強く依存する一方で、アーチ型応力上の掘削杭では、SHmax の方向が深さに強く依存し、その長期変化が地域的な断層運動の影響をあまり受けないという特徴を持つことが分かった。これは、アーチ型の応力が局所的に強い安定的な構造を維持することで説明ができる。近年海底観測における応力場の長期変動観測が注目を集めていることから、本研究結果が活用されることが将来期待される。

研究後半のハイライトは、粘着力を加えることで岩石破壊挙動を模擬する離散要素を開発し、数値岩石箱シミュレーションを実施したことである[Furuichi et al. 2023]。粘着力のパラメータは数値3軸圧縮試験によって調整した(図3(a))。その際、封圧再現するためのフレキシブルなメンブレン要素を開発し、また周期境界条件の大規模並列計算対応を実現し、学術論文にて報告している[Chen et al. 2023]。このようにして岩石破壊実験において検証されたモデルを使用し、海溝軸方向に周期境界条件を課した粒状体層の数値短縮実験を行ったところ、順次断層形成される付加体に特徴的な構造を再現することに成功した。本モデルにおいて、粘着力モデル中のヒーリング効果については、岩石実験からは求めることが難しいため、瞬間的にヒーリングが起きる場合とヒーリングがない場合について、その影響を調べたところ、表層角や表層亀裂、断層発達に分岐が、大きな影響を受けることを発見した(図3(b), (c))。また、断層形成プロセスにおける粒状性の役割として、断層厚みが物理的な長さよりも個別要素の数に依存している可能性を指摘した。粒状体のシアバンド幅が粒子数に制限されることは既往研究において知られているが、実スケールの断層モデルにおいて、そのような振る舞いを定量的に確認できた意義は大きい。そして得られた結果は、断層厚の成長が、ずれの長さがある一定値を超えると限界に達して飽和するというフィールド研究報告と調和的であり、その原因の一つとなる作業仮説になる。

さらに、上記の数値岩石箱実験において、弾性波を出す破壊的な要素運動が再現されることを発見した[Furuichi et al. 2024]。そして、詳細解析により得られた、波動伝播速度、断層破壊速度、応力降下量等の値は、一般的な地震挙動と整合的な結果であった。これは本アプリケーションが付加体構造発達から断層運動・破壊・地震波伝播までをシームレスに再現する新技術であることを示唆する研究成果となる。

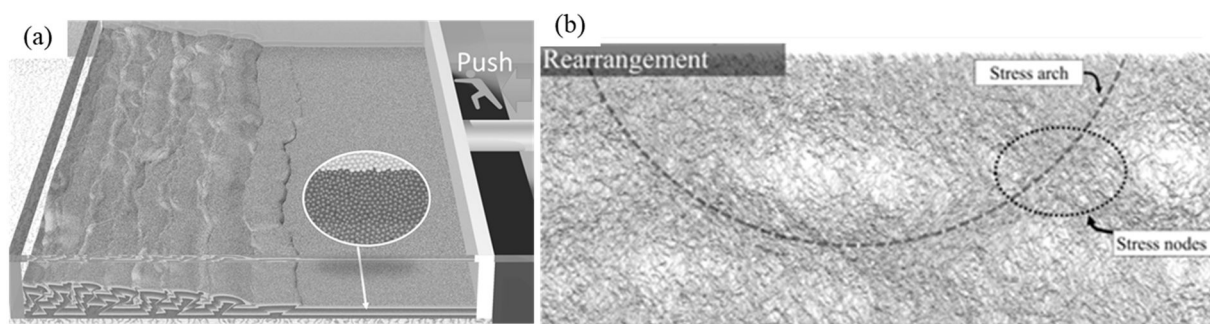


図2 数値砂箱実験の可視化例。(a) 固定された左側の壁に対して、右側の壁が床の壁と共に移動することにより、断層とそれに伴う隆起が、付加体に類似した構造が再現される。(b)は一回目の断層形成イベント時の応力鎖である。地図を見る視点で断層形成地点付近の応力鎖を可視化した。図の上部が固定された壁の方向となる。断層形成の開始直後を可視化しており、応力鎖が大きく組み変わる事で、自発的にアーチ状の応力構造(ダッシュ線)が表れた。

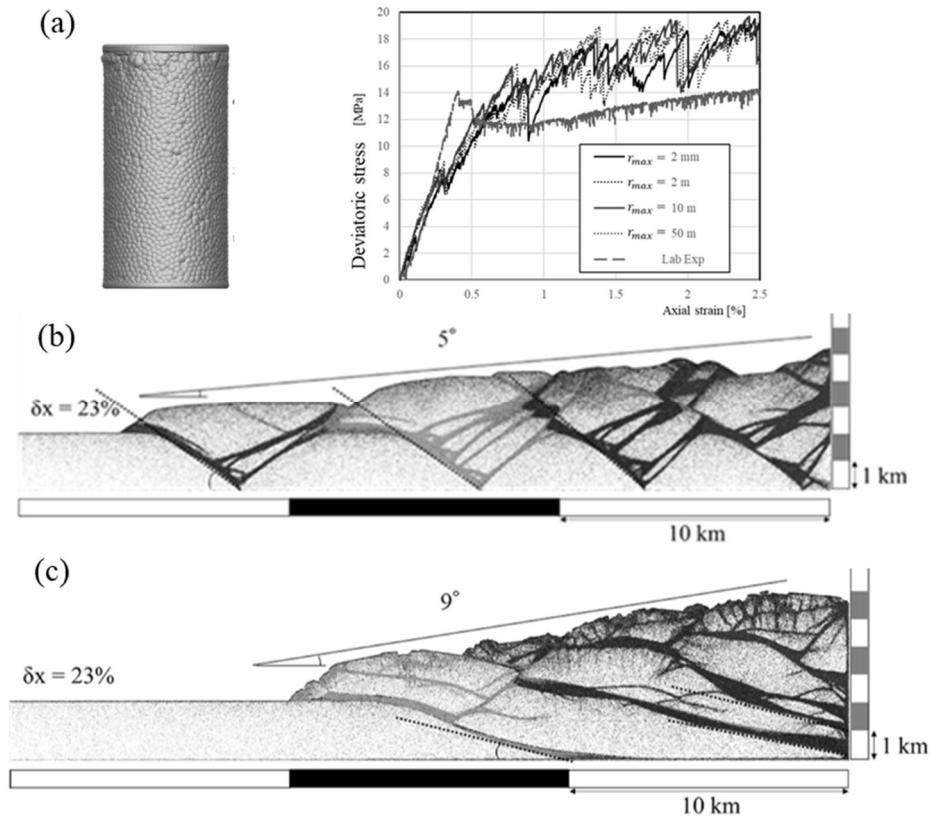


図 3 数値岩石箱実験の図。(a)粒状体による供試体の 3 軸圧縮実験シミュレーション結果と実験との比較。(b)粘着力ヒーリングがない場合の構造発達。(c)粘着力ヒーリングがあるときの構造発達。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Chen Jian、Nishiura Daisuke、Furuichi Mikito	4. 巻 392
2. 論文標題 DEM study of the influences of the geometric and operational factors on the mechanical responses of an underwater mixing process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 251 ~ 263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.powtec.2021.06.049	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 Chen Jian、Kitamura Azusa、Barbieri Ettore、Nishiura Daisuke、Furuichi Mikito	4. 巻 401
2. 論文標題 Analyzing effects of microscopic material parameters on macroscopic mechanical responses in underwater mixing using discrete element method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 117304 ~ 117304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.powtec.2022.117304	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 Nishiura Daisuke、Furuichi Mikito、Sakaguchi Hide	4. 巻 32
2. 論文標題 Real-scale DEM simulations on the fault evolution process observed in sandbox experiments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 4432 ~ 4441
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2021.09.007	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 Bauville Arthur、Furuichi Mikito、Gerbault Muriel	4. 巻 125
2. 論文標題 Control of Fault Weakening on the Structural Styles of Underthrusting Dominated Non Cohesive Accretionary Wedges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JB019220	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 Hosono Natsuki、Furuichi Mikito	4. 巻 75
2. 論文標題 Implementation of SPH and DEM for a PEZY-SC Heterogeneous Many-Core System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mechanisms and Machine Science	6. 最初と最後の頁 709 ~ 715
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-27053-7_60	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 Furuichi Mikito、Nishiura Daisuke、Kuwano Osamu、Bauville Arthur、Hori Takane、Sakaguchi Hide	4. 巻 8
2. 論文標題 Arcuate stress state in accretionary prisms from real-scale numerical sandbox experiments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8685
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-26534-x	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 Furuichi Mikito、Chen Jian、Nishiura Daisuke、Arai Ryuta、Yamamoto Yuzuru、Ide Satoshi	4. 巻 874
2. 論文標題 Virtual earthquakes in a numerical granular rock box experiment	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 230230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tecto.2024.230230	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 Chen Jian、Furuichi Mikito、Nishiura Daisuke	4. 巻 165
2. 論文標題 Toward large-scale fine resolution DEM landslide simulations: periodic granular box for efficient modeling of excavatable slope	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Computers and Geotechnics	6. 最初と最後の頁 105855 ~ 105855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compgeo.2023.105855	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 Furuichi Mikito, Chen Jian, Nishiura Daisuke, Arai Ryuta, Yamamoto Yuzuru	4. 巻 862
2. 論文標題 Thrust formation using a numerical granular rock box experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 229963 ~ 229963
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tecto.2023.229963	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 -

[学会発表] 計19件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Mikito Furuichi , Ryuta Arai , Yuzuru Yamamoto and Daisuke Nishiura
2. 発表標題 Numerical rock-box DEM simulation to investigate structure and stress state of accretionary prism formation
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Furuichi Mikito
2. 発表標題 Parallelization of DEPTH (DEM based Parallel multi physics simulator) for HPC
3. 学会等名 CCP-WSI Code Developers ' Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古市 幹人
2. 発表標題 大規模個別要素法計算による地すべりシミュレーションの取り組み
3. 学会等名 日本計算工学会 多元災害シミュレーション研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Furuichi, D. Nishiura and Y. Yamamoto
2. 発表標題 A DEM model of triaxial compression test of fault and host rocks
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古市 幹人
2. 発表標題 Massively parallel granular simulation and stress chain characterization with over billion particles
3. 学会等名 第6回理論応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jian Chen, Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura and Azusa Kitamura
2. 発表標題 A parametric study of a soil mixing process under water based on discrete element simulations: geometric and operational factors
3. 学会等名 The 11th International Conference on Computational Methods (ICCM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古市 幹人・西浦 泰介・桑野 修・Arthur Bauville・堀高峰・阪口秀
2. 発表標題 実スケール数値砂箱実験による付加体内部応力構造の解明
3. 学会等名 日本地質学会(招待講演)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Mikito Furuichi; Jian Chen, Natsuki Hosono, Daisuke Nishiura
2. 発表標題 Massively Parallel DEM Simulation and Stress Chain Characterization with over Billion Particles
3. 学会等名 SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Arthur Bauville, Mikito Furuichi, Muriel Gerbault
2. 発表標題 The structural styles of underthrusting-dominated non-cohesive tectonic wedges
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古市 幹人、Arthur Bauville、西浦 泰介1、堀 高峰1、桑野 修
2. 発表標題 The real-scale numerical sandbox experiments for understanding stress state in accretionary prisms
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura
2. 発表標題 2.4 billion particles DEM simulation of accretionary prism formation using an iterative dynamic load balancer.
3. 学会等名 8th International Conference on Discrete Element Methods (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Arthur Bauville and Mikito Furuichi
2. 発表標題 Development and propagation of a subduction plate interface: insight from hydro-thermo-mechanical models
3. 学会等名 EGU General Assembly 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西浦 泰介, 古市 幹人, Arthur Bauville, 堀 高峰, 桑野 修, 阪口 秀
2. 発表標題 リアルスケール粉体シミュレーションによる地盤内部の応力鎖と断層の発達過程
3. 学会等名 粉体工学会2018年度春期研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西浦 泰介, 古市 幹人
2. 発表標題 High performance computing of particle simulation method and its application for geophysical problems
3. 学会等名 名古屋大学 地球惑星物理学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Hosono and M. Furuichi
2. 発表標題 Implementation of SPH and DEM for the PEZY-SC computer
3. 学会等名 International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (ICCES 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura, Arthur Bauville and Takane Hori
2 . 発表標題 Seamount induced stress state in accretionary prism from real-scale numerical sandbox experiments
3 . 学会等名 AGU fall Meeting 2018
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura, Arthur Bauville, Osamu Kuwano, Takane Hori, Hide Sakaguchi
2 . 発表標題 Orientation of the SHmax in accretionary prisms from real-scale numerical sandbox experiments
3 . 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会 (招待講演)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Furuichi, D. Nishiura, T. Hori
2 . 発表標題 Massively parallel stress chain characterization for billion particle DEM simulation of accretionary prism formation
3 . 学会等名 The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis (SC18)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura
2 . 発表標題 2.4 billion particles DEM simulation of accretionary prism formation using an iterative dynamic load balancer
3 . 学会等名 DEM8: 8th International Conference on Discrete Element Methods (国際学会)
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
---------	---------