

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2016～2020

課題番号：16H06478

研究課題名（和文）非平衡物理学に基づくスロー地震と通常の地震の統一的理解

研究課題名（英文）Unified Understanding of Slow and Regular Earthquakes from Nonequilibrium Physics Point of View

研究代表者

波多野 恭弘 (Hatano, Takahiro)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：20360414

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 72,600,000 円

研究成果の概要（和文）：不均質構造を系統的に制御できるアナログ実験と数理モデルを用いて、「不均質な場が生み出す滑り現象の多様性」という物理的な観点からスロー地震の発生機構に関する理解を深めることができた。特に、様々な不均質構造における滑りの時空発展様式を整理することで、遅い滑りが加速し速い滑りへと遷移する現象の再現や、遅い滑りと速い滑りを分ける定量的条件を解明できた。アナログ試料変形実験では露頭で見られる流動・破壊パターンの再現に成功し、スロー地震に関する地質学的シナリオを力学的観点から裏付けた。地質学的凸凹構造をモデル化したシミュレーションでは、震源移動や巨大地震に対する先行すべりなどスロー地震の特徴を再現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数理モデル化を通じてより一般的な理解も深まった。例えば、一様な系で自発的に出現する遅い滑りのモデル化と観測との比較により、スロー地震には地質学的不均質性が不可欠であることを示すこともできた。また、断層の滑りが生態系の個体数変動と共通の枠組で理解できることも示した。複雑ネットワーク分野の概念を用いた新しい時系列解析手法により、通常の地震もスロー地震もマグニチュード時系列に相関があることが分かった。これらの理解を応用して、木材接合部や靴底など不均質材料の設計にもスロー地震研究の知見が生かせることが分かった。

研究成果の概要（英文）：Using analog experiments and mathematical models that can systematically control heterogeneous geological structures, we clarify the mechanism of slow earthquake generation from the physical point of view of "diversity of slip phenomena due to geological heterogeneity". In particular, we show how the spacetime evolution patterns of slip in various heterogeneous structures are related to geological/geophysical observations. We reproduce the acceleration phenomenon of slow slip to fast slip and elucidate the quantitative conditions that separate slow and fast slip. Analog sample deformation experiments successfully reproduced the flow and fracture patterns observed in outcrops, supporting the geological scenario for slow earthquakes from a mechanical point of view. Numerical simulation on fault roughness structure reproduces the essential features of slow slips such as source migration and precursory slip against large earthquakes.

研究分野：非平衡物理学

キーワード：スロー地震 非線形動力学 アナログ実験

## 1. 研究開始当初の背景

地震の「巣」である沈み込み帯プレート境界におけるすべり様式は、従来思われてきたよりはるかに多様で複雑であることが明らかになりつつある。その端緒を切ったのは、他ならぬ本領域に参加する研究者らによる、様々なスロー地震の発見であった [Hirose et al., 1999; Obara, 2002; Ito et al., 2007]。その後は世界の沈み込み帯で同じ現象が次々と発見され、スロー地震は通常の地震と同様にきわめて普遍的な現象であることが分かってきた。加えて、スロー地震の発生域は巨大地震の発生域と隣接しているため、「プレート境界巨大地震を理解するためにはスロー地震の理解も同時に必要である」という認識が共有されつつある。日本をはじめとする各国の高精度観測網のおかげで、スロー地震の規模や時空ダイナミクスはかなりの程度分かってきた [Ide et al. 2007]。同時に、発見以来 15 年あまりを経て、研究のステージが「発見」から「理解」へ移ってきているという認識も共有されつつある。「低速変形から高速すべりまでの地震現象の統一的理解」へ向けて、世界各国の地震学者がスタートを切った段階と言ってよい。

同時に、非平衡物理学分野においても地震現象の理解へ向けた新たな試みが開始されている。たとえば、透明な弾性体を用いた摩擦実験によって、静止状態から不安定すべりが始まる際の時空ダイナミクスを高精度で観察できるようになっている [Rubinstein et al. 2007; Namiki et al. 2014]。その結果、静止状態にある弾性体は、スロー地震に酷似した遅く非一様なすべりを経て動的な不安定すべりに至ることが分かってきた。このような遅い運動と速い運動の同居と切り替わりは、弾性体だけではなく、様々な実験系において普遍的に見られることも分かってきた。粘弾性流体の界面運動はその好例で、高速破壊的な運動とゆっくりした粘性的運動が競合する [Sumino et al. 2012]。これらの実験系はプレート境界と同一ではないが、弾性体や流体には固有の長さ定数がないので、原理的には巨大な系とのアナロジーが成立する可能性がある。

他方、すべり現象一般において重要な物理である摩擦法則に関しては、面のトポグラフィなどを通じて固有の長さ定数が入り込む可能性がある。岩石の摩擦力を調べる実験は地震学分野で古くから行われているが [Dieterich 1979]、その結果を実験室スケールから断層スケールまで外挿するロジックは現在のところ存在しない。室内摩擦実験の結果を地球科学スケールへつなげるためにも、室内実験結果のスケール依存性を解明することが極めて重要である。

**参考文献** : Dieterich, J. H., *J. Geophys. Res.* **84**, 2161-2168, 1979; Hirose et al., *GRL* **26**, 3237-3240, 1999; Ide et al., *Nature* **447**, 76-79, 2007; Ito et al., *Science* **315**, 503-506, 2007; Namiki A. et al., *J. Geophys. Res.* **119** doi:10.1002/2014JB011135; Sumino Y. et al., *Phys. Rev. E* **85**, 046307 (2012); Obara, *Science* **296**, 1679-1681, 2002; Rubinstein, S. M., Cohen, G. & Fineberg, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 226103, 2007.

## 2. 研究の目的

じわじわ進行するスロー地震と、高速かつ不安定に進展する通常の地震は、どのように共存・競合して沈み込み帯に蓄積されたひずみを解消しているのか？沈み込み帯という複雑で不均質な非平衡環境における物理量の詳細な情報は制限されているので、これは大変難しい問題である。そこで項目 C02 では、項目 B01 や B02 で解明した地質学的不均質構造に基づいて、「不均質な場が生み出す滑り現象の多様性」という物理的な観点からスロー地震の理解を目指した。その際、地質学的不均質性が生み出す現象をより普遍的な形で理解するため、「観測された不均質構造」のみならず「存在可能性のある不均質構造」にまで検討対象を広げ、不均質性に起因する多様な滑り様式をより一般的に理解することを目的とした。

具体的なアプローチは以下三つである。1) 弾性体や流体を用いたアナログ実験系において、速い現象と遅い現象が共存する複雑な時空ダイナミクスの現象論を確立し、一般的な数理モデルに落とし込んで理解する。2) 室内実験で得られた結果をプレート境界という巨大スケールへ適用するために、実験結果のスケール変換性を理論的に解明する。3) プレート境界の物理的実体に関する最低限の仮定に基づいた数理モデルの構築・解析を行い、スロー地震と通常の地震が共存し相互作用する仕組みを定量的に理解する。

上記課題は領域各班と連携して行なわれる。課題 1) と 3) においては、B01,02 班で得られた構造の特徴をモデルに適宜取り入れつつ、モデルの振る舞いを A01,02 班の観測結果と比較し、スロー地震と通常の地震が競合する機構の解明に資する。課題 2) においては B02 班による摩擦・透水実験の理論的基礎付けを行い、C01 班の地球科学モデルで用いられる摩擦法則の物理的基礎を与えることによって、実験室スケールとプレート境界スケールをつなぐ。

## 3. 研究の方法

本計画におけるアプローチ三つについて項目ごとに解説する。

### 1) 弾性体や流体を用いたアナログ実験

プレート境界を「時定数の異なる複数の運動機構が共存・競合する系」とみて、同じ特徴をもつ実験系をモデルとして研究する。物性や境界条件を自由に制御できる室内実験のメリットを生かし、複数の運動機構が出現する過程やそれらの競合・協同現象を詳細に解明する。

i) 透明な弾性体によるすべり実験：すべりの動的挙動をその場観察し、高速すべりとゆっくりすべりのスイッチ・分岐機構を定量的に特徴付ける。

ii) 粘弾性流体の界面進行の実験：粘弾性流体を挟み込んだ準二次元的セル内部に、別の物質（気体・液体・粉体など）を注入する。界面運動における遅い粘性的な運動と速い弾性的な運動の競合と遷移の動力学を観察し、流体のレオロジー特性や注入速度への依存性を解明する。加えて、濡れ界面の間欠的な進行における遅い運動と速い運動の切り替わりを測定する実験も行い、流体のレオロジー特性や駆動速度に対する依存性を解明する。

これらの実験結果に関する数理モデルを構築し、時定数や安定性の異なる多様な運動が競合する系に普遍的なメカニズムを理解する。現象の数理的な理解を通じて、「低速から高速までの地震の統一的理解」という領域の目標に貢献する。

## 2) 実験室とプレート境界のスケールギャップを埋める理論的研究

摩擦現象における固有の長さ定数の有無とそのスケール依存性を解明する。とくに上記 1 の実験、および B02 班で行う摩擦・透水実験に関して、その結果を地球科学的スケールまで適用する際の変換規則を理論的に解明し、実験室における現象とプレート境界との対応関係を明らかにする。他方、摩擦力のスケール依存性は断層の複雑形状（粗さ）にも起因すると考えられている。そこで自己アフィンの粗い断層を直接モデル化した数値シミュレーションも行い、すべりの安定性と断層面の粗さの関係を解明する。

## 3) プレート境界の物理的実体に即したミニマル数理モデルの構築・解析

すべりによる摩擦熱・微小亀裂の生成・流体移動という三つの物理的要因だけを仮定し、それらが動的に相互作用しながらすべり速度が決まる数理モデルを構築する。モデルの解析を通じてスロー地震から通常地震までを支配する統一的なメカニズムを解明する。モデルの単純さを生かし、地質学的時間スケールまでシミュレーションを実行する。プレート境界の不均一構造形成過程を解明し、B02 班で明らかになった構造や C01 班で仮定されるレオロジー構造の物理的根拠を与えることによって、本領域の目的に貢献する。

## 4. 研究成果

研究期間中は、不均質構造を系統的に制御できるアナログ実験と数理モデルを用いて、様々な不均質構造における滑りの時空発展様式を整理することで、遅い滑りが加速し速い滑りへと遷移する現象の再現や、遅い滑りと速い滑りを分ける定量的条件を解明できた。

### 4-1. 地質学的観察との融合と不均質性の評価

・地質学的シナリオの力学的実証：項目 B02 における地質学的観察からは、（脆性・延性）レオロジー不均質性がスロー地震の発生に寄与することが強く示唆されている。この発見に基づき、延性的な粘弾性中に脆性的な粉粒体を混入したアナログ試料による変形実験を行い、地質学的観察の直接検証を行った。岩石実験における挙動の再現でその妥当性を確認したのち、露頭でみられる流動・破壊パターンの再現に成功した（Otoguro & Sumino, 2021）。加えて、項目 B02 で提唱された化学反応を伴う岩石の剪断変形挙動も、不均質なレオロジーが生み出す時空パターンとして説明した。これらの実験を通じて、スロー地震の発生機構に関する地質学的シナリオを補強する力学的な証拠を提示できた。

・地質学的不均質構造が生むスロー地震：地質学的な凸凹構造が滑りに及ぼす影響については、グリーン関数に基づく直接シミュレーションの実装に成功した。局所的に始まった不安定な滑りが高速化せずにスロー地震として終わる様子を再現し、その結果を一般的な数式で表現した。同時に、高速化しつつ移動していくスロー地震の様子も再現し、巨大地震に先行するスロー地震の一つの特徴が再現できた（Ozawa et al., 2019）。加えて、凸凹のスケールが摩擦法則に与える影響について定量化を行い、室内実験スケールから断層スケールへの外挿を可能にする一つの道筋を示すことにも成功した。

・不均質構造が生む多様な滑り様式：摩擦強度の不均質性を制御した高分子ゲルの摩擦実験では、高速すべりに先行し発生する遅い滑りの時空間的挙動に関して、新しいクラス（パルス発振的な滑りの加速）を発見した。のみならず、滑りに伴う様々な動力学的挙動（応力・ひずみ場、すべり量、弾性波放出）を、可視化技術を用いたその場観察により取得し、通常地震とスロー地震との動的性質の差異を生み出すメカニズムを明らかにした（Yashiki et al., 2020）。

### 4-2. 一般化の試み

・一様系での遅い滑り：地質学的不均質性に関する反対命題として、不均質性のない一様な系で自発的に出現する遅い滑りの時空パターンもモデル化・解析し、観測と比較したが、結果は否定的であった。このことはスロー地震にとって地質学的不均質性が不可欠であることを示唆する（Sumino et al., 2021）。

・一般自然現象への応用：項目 C02 の特徴である数理化・一般化のメリットとして、地震だけではなく、他の自然現象にも応用可能な結果も複数得られた。例えば、滑り速度と岩石空隙率の二変数で記述できる簡素な断層モデルの方程式系が、生態系の個体数変化を記述する有名な方程式系と同型であり、断層の滑りと個体数変動の安定性が共通の枠組で理解し得ることを示した（Suzuki, 2017）。

・新たな融合研究の発展：これらの力学系的モデル研究とは相補的に、複雑ネットワーク分野

の概念を用いた新しい時系列解析手法を地震のマグニチュード時系列に応用する学際的な研究も生まれた。地震学分野ではマグニチュード時系列が無相関とする統計モデルが支配的で、それと矛盾する結果はこれまで知られていない。しかしこの新手法を用いることで、通常地震もスロー地震(微動)もマグニチュード時系列には相関のあることが結論された(Kundu et al. 2021)。マグニチュード時系列に潜む相関は大地震発生の予測とも関わるため、この発見には更なる展開が期待される。

これらの理解の異分野への応用として、木材接合部や靴底など様々な不均質材料の設計にもスロー地震研究の知見が生かせることが分かった。以上の点を鑑みれば当初計画以上の結果を得たと言える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計43件（うち査読付論文 41件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Itagaki Nozomi, Kawaguchi Daisuke, Oda Yukari, Nemoto Fumiya, Yamada Norifumi L., Yamaguchi Tetsuo, Tanaka Keiji	4. 巻 52
2. 論文標題 Surface Effect on Frictional Properties for Thin Hydrogel Films of Poly(vinyl ether)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 9632 ~ 9638
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.9b01786	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 Kusaka Yasuyuki, Mizukami Makoto, Yamaguchi Tetsuo, Fukuda Nobuko, Ushijima Hirobumi	4. 巻 29
2. 論文標題 Patterning defects in high-speed reverse offset printing: lessons from contact dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Micromechanics and Microengineering	6. 最初と最後の頁 045001 ~ 045001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6439/ab024b	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 Yamaguchi Tetsuo, Onoue Yudai, Sawae Yoshinori	4. 巻 124
2. 論文標題 Topology and Toughening of Sparse Elastic Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 68002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.068002	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 Hirose Yuhei, Yasugahira Yusuke, Okamoto Mamoru, Koyano Yuki, Kitahata Hiroyuki, Nagayama Masaharu, Sumino Yutaka	4. 巻 89
2. 論文標題 Two Floating Camphor Particles Interacting through the Lateral Capillary Force	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074004 ~ 074004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.074004	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 Chanard K., Nicolas A., Hatano T., Petrelis F., Latour S., Vinciguerra S., Schubnel A.	4. 巻 46
2. 論文標題 Sensitivity of Acoustic Emission Triggering to Small Pore Pressure Cycling Perturbations During Brittle Creep	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 7414 ~ 7423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019gl082093	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 該当する

1. 著者名 Ikeda Atsushi, Kawasaki Takeshi, Berthier Ludovic, Saitoh Kuniyasu, Hatano Takahiro	4. 巻 124
2. 論文標題 Universal Relaxation Dynamics of Sphere Packings below Jamming	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 58001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.058001	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 Saitoh Kuniyasu, Hatano Takahiro, Ikeda Atsushi, Tighe Brian P.	4. 巻 124
2. 論文標題 Stress Relaxation above and below the Jamming Transition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 118001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.118001	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 Suzuki Takehito, Matsukawa Hiroshi	4. 巻 88
2. 論文標題 Transition between Macroscopic Steady Slippage and Creep Motion in a System with Velocity-Dependent Friction Stress	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114402 ~ 114402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.114402	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 Yamaguchi Yuta, Takada Satoshi, Hatano Takahiro	4. 巻 87
2. 論文標題 Rheology of Cohesive Granular Particles under Constant Pressure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 094802 ~ 094802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.094802	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 Tsuji Daisuke, Otsuki Michio, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 120
2. 論文標題 Relaxation Dynamics of a Granular Pile on a Vertically Vibrating Plate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 128001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.128001	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 Ootani Yusuke, Xu Jingxiang, Hatano Takahiro, Kubo Momoji	4. 巻 122
2. 論文標題 Contrasting Roles of Water at Sliding Interfaces between Silicon-Based Materials: First-Principles Molecular Dynamics Sliding Simulations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 10459 ~ 10467
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b01953	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 Roy Subhadeep, Hatano Takahiro	4. 巻 97
2. 論文標題 Creeplike behavior in athermal threshold dynamics: Effects of disorder and stress	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 62149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.97.062149	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 Matcharashvili Teimuraz, Hatano Takahiro, Chelidze Tamaz, Zhukova Natalia	4. 巻 25
2. 論文標題 Simple statistics for complex Earthquake time distributions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nonlinear Processes in Geophysics	6. 最初と最後の頁 497 ~ 510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/npg-25-497-2018	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 Itoh Ryo, Hatano Takahiro	4. 巻 377
2. 論文標題 Geological implication of grain-size segregation in dense granular matter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20170390
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsta.2017.0390	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 Ozawa So W., Hatano Takahiro, Kame Nobuki	4. 巻 46
2. 論文標題 Longer Migration and Spontaneous Decay of Aseismic Slip Pulse Caused by Fault Roughness	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 636 ~ 643
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018GL081465	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 Hatano Takahiro	4. 巻 14
2. 論文標題 The Third Law of Earthquake Statistics?	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPSJ News and Comments	6. 最初と最後の頁 03 ~ 03
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJNC.14.03	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 -

1. 著者名 Flachi Antonino, Nitta Muneto, Takada Satoshi, Yoshii Ryosuke	4. 巻 119
2. 論文標題 Sign Flip in the Casimir Force for Interacting Fermion Systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 31601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.119.031601	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 Hayakawa Hisao, Takada Satoshi	4. 巻 140
2. 論文標題 Kinetic theory of discontinuous shear thickening	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 09003 ~ 09003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201714009003	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 Hayakawa Hisao, Takada Satoshi, Garzo Vicente	4. 巻 96
2. 論文標題 Kinetic theory of shear thickening for a moderately dense gas-solid suspension: From discontinuous thickening to continuous thickening	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 42903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.96.042903	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 Murakami Teruo, Yarimitsu Seido, Sakai Nobuo, Nakashima Kazuhiro, Yamaguchi Tetsuo, Sawae Yoshinori	4. 巻 113
2. 論文標題 Importance of adaptive multimode lubrication mechanism in natural synovial joints	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 306 ~ 315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.triboint.2016.12.052	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 Murakami Teruo, Yarimitsu Seido, Sakai Nobuo, Nakashima Kazuhiro, Yamaguchi Tetsuo, Sawae Yoshinori, Suzuki Atsushi	4. 巻 231
2. 論文標題 Superior lubrication mechanism in poly(vinyl alcohol) hybrid gel as artificial cartilage	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology	6. 最初と最後の頁 1160 ~ 1170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1350650117712881	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 Suzuki Takehito	4. 巻 96
2. 論文標題 Emergence and seismological implications of phase transition and universality in a system with interaction between thermal pressurization and dilatancy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 23005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.96.023005	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 Takada Satoshi, Serero Dan, Poschel Thorsten	4. 巻 29
2. 論文標題 Homogeneous cooling state of dilute granular gases of charged particles	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 083303 ~ 083303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4993620	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 Tanaka Yoshiyuki, Suzuki Takehito, Imanishi Yuichi, Okubo Shuhei, Zhang Xinlin, Ando Miwako, Watanabe Atsushi, Saka Mamoru, Kato Chiaki, Oomori Shuichi, Hiraoka Yoshifumi	4. 巻 70
2. 論文標題 Temporal gravity anomalies observed in the Tokai area and a possible relationship with slow slips	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-018-0797-5	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 Wagatsuma Shu, Higashi Takuro, Sumino Yutaka, Achiwa Ayumi	4. 巻 95
2. 論文標題 Pattern of a confined chemical garden controlled by injection speed	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 52220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.95.052220	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 Tsuji Daisuke, Otsuki Michio, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 120
2. 論文標題 Relaxation Dynamics of a Granular Pile on a Vertically Vibrating Plate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 128001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.128001	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 T. Murakami, S. Yarimitsu, K. Nakashima, N. Sakai, T. Yamaguchi, and Y. Sawae	4. 巻 98 (supp 9)
2. 論文標題 SUPERIOR LUBRICATION ABILITY AND MINIMAL WEAR OF POLY (VINYL ALCOHOL) HYBRID HYDROGEL AS A NOVEL MATERIAL APPLICATION FOR ARTIFICIAL CARTILAGE	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Bone & Joint Journal	6. 最初と最後の頁 65
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 T. Murakami, S. Yarimitsu, K. Nakashima, T. Yamaguchi, Y. Sawae, and N. Sakai	4. 巻 98 (supp 9)
2. 論文標題 INFLUENCE OF SYNOVIA CONSTITUENTS ON FRICTION AND WEAR IN ARTIFICIAL HYDROGEL CARTILAGE AS A NOVEL MATERIAL APPLICATION FOR JOINT PROSTHESES	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Bone & Joint Journal	6. 最初と最後の頁 59
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 Tanaka Yoshimi, Shimazaki Risa, Yano Satoshi, Yoshida Gaku, Yamaguchi Tetsuo	4. 巻 12
2. 論文標題 Solvent effects on the fracture of chemically crosslinked gels	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 8135 ~ 8142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C6SM01645F	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 Yamaguchi Tetsuo, Sawae Yoshinori, Rubinstein Shmuel M.	4. 巻 9
2. 論文標題 Effects of loading angles on stick-slip dynamics of soft sliders	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Extreme Mechanics Letters	6. 最初と最後の頁 331 ~ 335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eml.2016.09.008	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 Koyano Yuki, Gryciuk Marian, Skrobanska Paulina, Malecki Maciej, Sumino Yutaka, Kitahata Hiroyuki, Gorecki Jerzy	4. 巻 96
2. 論文標題 Relationship between the size of a camphor-driven rotor and its angular velocity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 12609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.96.012609	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 Necas D., Sawae Y., Fujisawa T., Nakashima K., Morita T., Yamaguchi T., Vrbka M., Krupka I., Hartl M.	4. 巻 11
2. 論文標題 The Influence of Proteins and Speed on Friction and Adsorption of Metal/UHMWPE Contact Pair	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Biotribology	6. 最初と最後の頁 51 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biotri.2017.03.003	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 Sano Tomohiko G., Yamaguchi Tetsuo, Wada Hirofumi	4. 巻 118
2. 論文標題 Slip Morphology of Elastic Strips on Frictional Rigid Substrates	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 178001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.118.178001	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 Tanaka Hiroki, Hatano Takahiro	4. 巻 90
2. 論文標題 Statistical properties of Olami-Feder-Christensen model on Barabasi-Albert scale-free network	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The European Physical Journal B	6. 最初と最後の頁 248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjb/e2017-80295-0	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 Okada Masahide, Sumino Yutaka, Ito Hiroaki, Kitahata Hiroyuki	4. 巻 102
2. 論文標題 Spontaneous deformation and fission of oil droplets on an aqueous surfactant solution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 42603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.102.042603	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 Yajima Sho, Yoshii Kiwamu, Sumino Yutaka	4. 巻 89
2. 論文標題 Aversion of Pedestrians to Face-to-Face Situations Eases Crowding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074003 ~ 074003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.074003	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 Yashiki Takuya, Morita Takehiro, Sawae Yoshinori, Yamaguchi Tetsuo	4. 巻 124
2. 論文標題 Subsonic to Intersonic Transition in Sliding Friction for Soft Solids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 238001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.238001	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 Suzuki Takehito	4. 巻 90
2. 論文標題 Characteristic Sensitivity of Turbulent Flow within a Porous Medium under Initial Conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024401 ~ 024401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.024401	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 Petrelis Francois, Chanard Kristel, Schubnel Alexandre, Hatano Takahiro	4. 巻 2021
2. 論文標題 Earthquake sensitivity to tides and seasons: theoretical studies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment	6. 最初と最後の頁 023404 ~ 023404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/abda29	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 該当する

1. 著者名 Yamaguchi Yuta, Biswas Soumyajyoti, Hatano Takahiro, Goehring Lucas	4. 巻 102
2. 論文標題 Failure processes of cemented granular materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 52903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.102.052903	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 Sato Yuji, Shinzato Shuhei, Ohmura Takahito, Hatano Takahiro, Ogata Shigenobu	4. 巻 11
2. 論文標題 Unique universal scaling in nanoindentation pop-ins	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-17918-7	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 Roy Subhadeep, Hatano Takahiro	4. 巻 2
2. 論文標題 Creep failure in a threshold-activated dynamics: Role of temperature during a subcritical loading	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.023104	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 該当する

1. 著者名 Ootani Yusuke, Xu Jingxiang, Takahashi Naoki, Akagami Kenta, Sakaki Satoshi, Wang Yang, Ozawa Nobuki, Hatano Takahiro, Adachi Koshi, Kubo Momoji	4. 巻 124
2. 論文標題 Self-Formed Double Tribolayers Play Collaborative Roles in Achieving Superlow Friction in an Aqueous Environment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 8295 ~ 8303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c02068	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

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Takahiro Hatano
2. 発表標題 Crackling noise in sheared granular matter
3. 学会等名 STATPHYS Kolkata IX (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takahiro Hatano
2. 発表標題 Rate and state friction law as derived from atomistic processes at asperities
3. 学会等名 ICTAM 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takahiro Hatano
2. 発表標題 Rate and State Friction Law and Its Scaling Property
3. 学会等名 Tribology - Gordon Research Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takahiro Hatano
2. 発表標題 Crackling noise in sheared granular matter
3. 学会等名 FRACMEET - Plasticity and failure in disordered materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takahiro Hatano
2. 発表標題 Creep-like relaxation in athermal systems
3. 学会等名 International workshop on Glasses and Related Nonequilibrium Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017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	住野 豊  (Sumino Yutaka)  (00518384)	東京理科大学・理学部第一部応用物理学科・准教授   (32660)	
研究分担者	鈴木 岳人  (Suzuki Takehito)  (10451874)	青山学院大学・理工学部・助教   (32601)	
研究分担者	山口 哲生  (Yamaguchi Tetsuo)  (20466783)	九州大学・工学研究院・准教授   (17102)	

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			
フランス	Ecole Normale Supérieure	University Paris Diderot		
フランス	University Claude Bernard Lyon 1			
インド	Institute of mathematical Physics			