

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：32601  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2014～2016  
課題番号：26400403  
研究課題名(和文) 摩擦の物理

研究課題名(英文) Physics of Friction

## 研究代表者

松川 宏 (MATSUKAWA, Hiroshi)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：20192750

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：1、弾性体の前駆滑りの解析的研究を実施した。2、砂の摩擦の振る舞い、特に水分含有量依存性を明らかにした。3、計算機実験によりナノスケール接合の剪断破壊の機構を明らかしつつある。4、階層性を取り込み、原子分子スケールからメソスケール、マクロスケールに至る摩擦の法則を理論的に解明しつつある。5、地震ではある種の臨界現象が見られるが、地震のモデルにもとづきその普遍性クラスを明らかにすることを試みた。

研究成果の概要(英文)：1, Analytical study of precursor slip in elastomer is examined. 2, The peculiar feature of the friction of sand, especially the water content dependence was made clear. 3, The mechanism of the shear breaking of nanoscale junction has been made clear by computer simulation. 4, The law of friction from atomic and molecular scale, mesoscale to macroscale has been made clear theoretically by taking into account of the hierarchy of the friction. 5, Some kinds of critical phenomena are observed in earthquake. We tried to clarify the universality class of the critical phenomena based on the earthquake model.

研究分野：物性物理学

キーワード：摩擦 スティック-スリップ アモントン・クーロンの法則 摩擦の法則 トライボロジー ナノテクノロジー 地震

### 1. 研究開始当初の背景

マクロな2つの固体間に働く乾燥滑り摩擦については、高校の物理の教科書にも登場する次のアモントンの法則と呼ばれる経験則が広い範囲で成り立つ。i)摩擦力は荷重に比例する、ii)摩擦力は2つの固体の見掛けの接触面積に依らない。この法則によれば摩擦力と固体に掛かる荷重の比で与えられる摩擦係数は荷重にも見かけの接触面積にも依らない。この摩擦の原因は右図に示すような固体表面の凸凹の結果生じる真実接触点での凝着によると考えられており、全真実接触面積が荷重に比例し見掛けの接触面積に依らないためアモントンの法則が成り立つと説明される。しかしこれに対する反論もある。また、法則の成立範囲も明かではない。事実、最近我々は局所的にはアモントンの法則が成り立つ粘弾性体においても、弾性体全体の静摩擦係数は荷重とともに減少する可能性があることを数値的・理論的に示し、その後実験により検証した。

摩擦を軽減するため、滑り面間に流体潤滑剤やコロのような固体を導入することは古くから行われている。そのような滑り面間に介在物が存在する系も原子・分子スケールから地震まで様々なスケールで存在し摩擦現象を示す。

これら固体同士が直接接する系やその間に介在物が存在する系など様々な系の摩擦現象には各々の系の個性-多様性-とともに普遍性がある。固着と滑りを繰り返すスティック・スリップ運動は様々な系で普遍的に現れるが、その振る舞いには各々の系での個性もあり、多様性と普遍性を示す一例である。しかしこれらの多様性と普遍性の理解も未だ遠い。このように摩擦についての基本的な多くの問題が今日まで未解決のまま残されてきた原因はこれまで、摩擦が発生する試料表面の制御が困難であったことや実験手段が極めて限られていたことにある。加えて、動摩擦は基本的にエネルギー散逸を伴う非平衡現象であることが、多くの研究者の挑戦を退けてきた原因にあげられる。

しかし、近年の物質科学・実験技術の進歩は、摩擦顕微鏡など多くの新しい実験手段を用いた制御された条件下での摩擦の研究を可能とした。最近では放射光を用いた摩擦実験も行われている。高速化した計算機によるシミュレーションも多くの情報を与えてくれる。また、最近の非平衡系の科学の発展は目覚ましく、その成果を利用することにより摩擦の研究には新展開が起こりつつあり、またその新展開は非平衡系の研究に新たな概念を生むものとなる。一方、近年の技術の進歩は、ナノマシンの摩擦など多くの新しい問題を引き起こし、その解決のため摩擦機構の解明が急務となっている。それらは物性科学の問題としてもほとんど未開拓の分野であり、学問的にも極めて興味深い。このように、現在、摩擦機構の解明が学問的・社会的

に強く要請されており、物性科学の新しい手段、視点によりその解明を図るための環境は急速に整いつつある。

### 2. 研究の目的

摩擦は最も身近な物理現象の1つであり応用上も極めて重要であるため古代から調べられてきたが、多くの基本的な問題が未解決である。本研究は、解析計算、数値シミュレーション、さらにある分野においては実験をも合わせて行い、現代物質科学・技術の成果をもとに新しい視点から、様々な分野における多様な系・スケールの摩擦機構の研究を有機的に繋げる。そして、原子・分子スケールからマクロスケールにわたる現象の階層性を正しく取り込み、様々な系における摩擦の普遍性と多様性の機構を明かにし、摩擦の基礎的・統一的描像を確立することを目標とする。さらに、その成果を応用上の問題に展開する。

### 3. 研究の方法

原子・分子スケールからマクロ系の摩擦を理解し、摩擦の普遍性と個性を明らかにするため、1. 固体界面の摩擦、2. 介在物のある系、を対象として、解析的手法、数値実験及び実験により研究を進める。解析的手法及び数値実験においては、原子論的モデルと有効モデルをともに用い現象の解明を計る。数値実験においてはモデルに応じて有限要素法、離散要素法、分子動力学法を用い、さらにそれらを組み合わせたマルチスケールシミュレーションを行う。併せて有効モデルの基礎付けも行い、異なる階層間の研究をつなげる。粉体の実験は代表者の研究室において行う。

### 4. 研究成果

(1) 以下の研究により摩擦の法則はスケールに依存し、駆動・荷重条件などが様なシステムでは広い範囲でアモントンの法則が成り立つことを明らかにした。

(1-1) 単一真実接触点のダイナミクスを分子動力学法により調べた。剪断時の真実接触点の変形、および、垂直応力(緑線)、摩擦力(青線)を図1に示す。内挿図は波数空間での構造因子を示している。ここで二つの凸はHCP

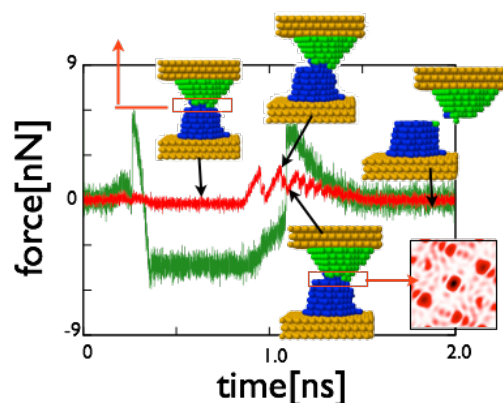


図1

の基盤（その構成原子を黄色で示す）上に作られている。最初、二つの凸を一定の斥力が働くまで押し付け合い真実接触点を作り、その後、基盤間の間隔を一定に保ち剪断をかける。剪断時に実験で観測されていると同様の格子間隔のサイズのスティック・スリップ運動が観測される。また剪断に伴う摩擦（上下の凸の間の原子の移動）も見えている。

この計算を真実接触面積を変えて系統的に行った結果、最大静摩擦力は、上下の凸の結晶軸がお互いにそろったコメンシュレートの場合は真実接触面積に比例するが、そろわないインコメンシュレートの場合は、真実接触面積の平方根に比例することが明らかになった。前者の場合、一つの真実接触点の最大静摩擦力は荷重に比例するが、後者の場合は比例しない。一般には真実接触点を形成する凸同士はインコメンシュレートなため、単一真実接触点の系では最大静摩擦力は荷重に比例せず、アモントンの法則は成り立たないといえる。

(1-2) 一般には物体の表面はサブミリメートルからマイクロメートル程度のスケールで見れば図 2 に示すように凹凸があり、2 物体の表面を接しさせた場合、多くの真実接触点を形成する。系全体の摩擦力は各々の真実接触点からの摩擦力の総和となる。このとき、表面の高さ分布は、多くの表面でガウス分布に従うことが知られている。

この場合に関して解析的理論により、一つ一つの真実接触点の摩擦力がその面積に比例しなくとも、系全体の摩擦力は全真実接触面積に比例し、荷重にも比例すること、また見掛けの接触面積には依存しないことを示す事に成功した。この結果は表面の様々な不均一性を取り入れても、また凸と凸の間の変形の相関を取り入れても、系の駆動条件や荷重条件が一樣と見なされる場合には変わらない。すなわちそのような場合には広い範囲でアモントンの法則が成り立つことを示すことができた。

(1-3) しかし、巨視的な系では多くの場合、自発的に駆動条件や荷重条件に不均一性が発生する。そのとき、アモントン則が破れ最大静摩擦力は荷重とともに減少する場合があることを我々は示している。

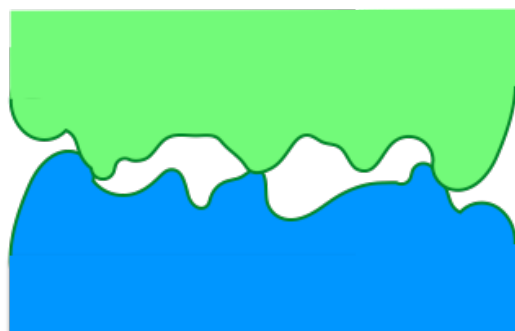


図 2

これらの研究により、摩擦の法則はスケールに依存し、駆動・荷重条件などが一樣なシステムでは広い範囲でアモントンの法則が成り立つことを明らかにした。

(2) 介在物として粉体を挟んだ系の摩擦現象を数値的、および実験的に調べ、そのときのスリップサイズの頻度分布が、地震で観測されておると同様なべき乗則に多くの場合従うことを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 4 件）

①松川 宏、“摩擦の法則の階層性”、*トライボロジスト*, 61, 495-505 (2016) 査読有り。

②M. Ishikawa, N. Wada, T. Miyakawa, H. Matsukawa, M. Suzuki, N. Sasaki and K. Miura, “Experimental observation of phonon generation and propagation at a  $\text{MoS}_2(0001)$  surface in the friction process.”, *Physical Review B* **93**, 201401-15 (2016) 査読有り。

③松川 宏、大槻 道夫、中野 健、“局所的前駆滑りによるアモントン則の破れと新しい摩擦法則”、*表面科学*, **36**, 222-229 (2015) 査読有り

④ Y. Katano, K. Nakano, M. Otsuki, H. Matsukawa, “Novel Friction Law for the Static Friction Force based on Local Precursor Slipping”, *Scientific Reports*, **4**, 6324[6pages] (2014) 査読有り。

〔学会発表〕（計 18 件）

①Hiroshi MATSUKAWA, Sliding friction of dry and wet sand and the hysteresis of density of wet sand、*International workshop on Glasses and Related Nonequilibrium Systems*, 2017 年 3 月 21 日-23 日、大阪大学 中之島センター（大阪府・大阪市）

②松川宏、摩擦のアモントンの法則の成立機構と摩擦の法則の階層性、*日本物理学会 2016 年秋季大会*, 2016 年 9 月 13 日-16 日、金沢大学（石川県・金沢市）

③Hiroshi MATSUKAWA, Superlubricity of the flake on the substrate、*UEC International Nanotribology Colloquium*, 2016 年 9 月 2 日、電気通信大学（東京都・調布市）

④Hiroshi MATSUKAWA, Hierarchy of Law of Friction, Dynamics of Electron Vortex and Spin Vortex, 2016 年 7 月 1 日-3 日、豊田産業技術記念館（愛知県・名古屋市）

⑤Hiroshi MATSUKAWA, Hierarchy of Law of Friction, *The 2016 Gordon Research Conference on Tribology*, 2016 年 6 月 25 日-7 月 1 日、Bates College Lewiston, ME, USA

⑥Hiroshi MATSUKAWA, Friction and Stick-Slip Motion of Solids and Granular Systems、Avalanches, plasticity, and nonlinear response in nonequilibrium solids, 2016 年 3 月 7 日、Yukawa

Institute for Theoretical Physics (YITP), Kyoto University (京都府・京都市)

⑦ Hiroshi MATSUKAWA, Law of friction at Atomic, Mesoscopic and Macroscopic Scales, International Tribology Conference, Tokyo 2015, 2015年9月16日、東京理科大学 葛飾キャンパス (東京都・葛飾区)

⑧ Hiroshi MATSUKAWA, Numerical Study of Avalanche Size Distribution of Sheared Granular Particles, International Tribology Conference, Tokyo 2015, 2015年9月16日、東京理科大学 葛飾キャンパス (東京都・葛飾区)

⑨ Hiroshi MATSUKAWA, Theory of Amontons' Law of Friction, International Meeting on Friction - from atomic to geophysical scales -, 2015年9月14日東京大学 地震研究所 (東京都・文京区)

⑩ 松川宏, アスペリティ間の相関を取り入れた摩擦のアモントン則の単純で一般的な説明, 日本物理学会 第70回年次大会, 2015年3月24日、早稲田大学 早稲田キャンパス (東京都・新宿区)

⑪ 松川宏, 摩擦発生メカニズムとスキーの滑走, 日本機械学会北陸信越支部, 2014年12月16日、金沢大学角間キャンパス (石川県・金沢市)

⑫ 松川宏, 摩擦の法則はスケールによって異なる, 電気通信大学ナノトライボロジー研究ステーション 第一回 ワークショップ, 2014年9月30日、電気通信大学 (東京都・調布市)

⑬ 松川宏, 摩擦のアモントンの法則が広い範囲で成立する理由, トライボロジー会議 2014秋, 2014年11月5日、アイーナ いわて県民情報交流センター (岩手県・盛岡市)

⑭ 松川宏, 単一真実接触点の摩擦と表面エネルギーの計算機実験, トライボロジー会議 2014秋, 2014年11月6日、アイーナ いわて県民情報交流センター (岩手県・盛岡市)

⑮ 松川宏, 摩擦のアモントン則が多様な系で成立する理由, 日本物理学会 2014年秋季大会, 2014年9月10日、中部大学 春日井キャンパス (愛知県・春日井市)

⑯ (M. Otsuki), Y. Katano, H. Kato and K. Nakano, H. Matsukawa, Friction Laws at Micro, Meso and Macro Scales, Tribology Gordon Research Conference, 2014年7月23日、Bentley University, MA, USA

⑰ (片野祐)・中野健・大槻道夫・松川宏, 弾性体のすべり摩擦実験における局所的前駆すべりとアモントン則の破れⅡ, トライボロジー会議 2014春, 2014年5月21日、国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都・渋谷区)

⑱ (加藤弘気)・大槻道夫・松川宏, 単一真実接触点の生成・引き離し及び剪断破壊による摩擦の計算機実験, トライボロジー会議 2014春, 2014年5月19日、国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都・渋谷区)

[その他]

ホームページ等

<http://www.phys.aoyama.ac.jp/~w3-matsu/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松川 宏 (MATSUKAWA, Hiroshi)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：20192750

### (2) 研究分担者

鈴木 岳人 (SUZUKI, Takehito)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：10451874

大槻 道夫 (OTSUKI, Michio)

島根大学・総合理工学研究科・講師

研究者番号：30456751