

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03792

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：メゾスケールの摩擦の振る舞いに関しては、真実接触点を多数含む現実の摩擦面と同じく自己相似性を持つランダムな表面を考え一つの真実接触点の振る舞いから理論的に、全真実接触面積、全摩擦力の荷重依存性の式を導くことに成功した。マクロな弾性体における前駆滑りと摩擦に関しては、底面形状依存性を明らかにした。さらにバネブロックモデルに粘弾性項を加えた有効モデルを提案し、粘弾性項を導入すると、滑りの頻度分布に関して冪乗則が成り立たなくなることを示した。粉体に剪断をかけた系の速度の分布を調べ、それが粉体間の摩擦係数、および時間により液体的振る舞いから固体的振る舞いへ連続的に変化する可能性があることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
得られた研究成果により、微視的モデルから巨視的系の摩擦の振る舞いを明らかにすることに部分的に成功し、摩擦の制御に向けた足がかりを得た。

研究成果の概要（英文）：As for meso-scale friction behavior, we theoretically derived load-dependent expressions for the total true contact area and total frictional force from the behavior of a single true contact point, considering a random surface that contains many true contact points and is self-similar to a real friction surface. For the macroscopic elastic body, the dependence on the shape of the bottom surface was clarified for the precursory slip and friction. Furthermore, we proposed an effective model that adds a viscoelastic term to the spring-block model, and showed that the power law no longer holds for the frequency distribution of sliding when the viscoelastic term is introduced. The distribution of velocity in a system of sheared powders was investigated, and it was shown that the velocity may continuously change from liquid-like to solid-like behavior depending on the friction coefficient between the powders and on time.

研究分野：摩擦の物理

キーワード：摩擦 スティックスリップ 前駆滑り 地震 アモントンクーロンの法則 摩擦の制御 冪乗則

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ものと考えられており、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、法則が成り立たない場合もある。事実、我々は局所的にはアモントンの法則が成り立つ剛体基板上の弾性体において、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。また、原子スケールから巨視的スケールにいたる様々な系で、静摩擦係数は2つの物体を接触させてから滑り出すまでの時間である待機時間に、動摩擦係数は滑り速度に依存することが実験的にわかっている。しかし、そのような依存性の満足いく理論的説明やアモントンの法則が成り立つ条件は明らかではない。

また、摩擦を軽減するため滑り面間に流体・固体潤滑剤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、摩擦力顕微鏡など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実験も行われている。発達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ミクロスケールからの解明が急務となっている。それらは物性科学、統計力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、「どのようなシステム・環境でどのような摩擦が起こるのか？その機構は何か？」という問いに答えることが学問的・社会的に強く要請されており、物性科学、統計力学の新しい手段、視点によりその問いに答えるための環境は急速に整いつつある。

2. 研究の目的

究極的には原子スケールから巨視的スケールに至る摩擦現象の研究をつなげ様々な摩擦現象の機構を解明し、摩擦現象の普遍性と多様性の起源を明らかにし、応用につなげることを目的とする。具体的には以下を明らかにすることを目的とする。

- (1) 真実接触点の摩擦と滑りの機構
- (2) メゾスケールの摩擦の振る舞い
- (3) マクロな弾性体における前駆滑りと摩擦
- (4) 滑り面間に介在物がある系の摩擦
- (5) 基盤上の原子フレークのダイナミクスと超潤滑

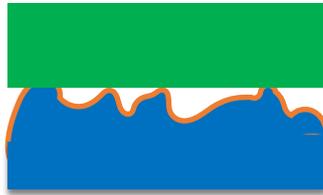
3. 研究の方法

数値的方法と解析的方法をともに用いて研究目的の遂行に努めた。

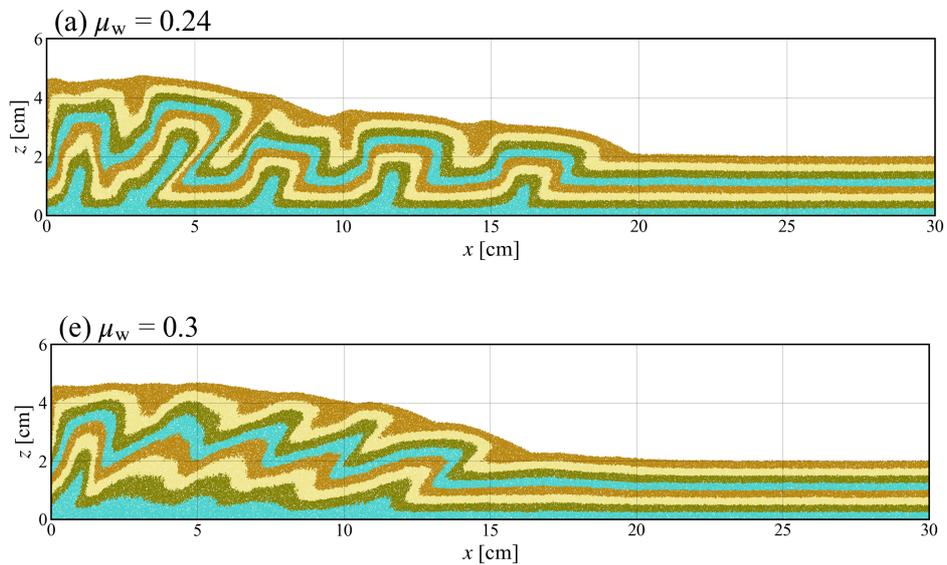
4. 研究成果

メゾスケールの摩擦の振る舞いに関しては、真実接触点を多数含む現実の摩擦面と同じく自己相似性を持つランダムな表面を考え一つの真実接触点の振る舞いから理論的に、全真実接触面積、全摩擦力の荷重依存性の式を導くことに成功した。マクロな弾性体における前駆滑りと摩擦に関しては、底面形状依存性を明らかにした。さらにバネブロックモデルに粘弾性項を加えた有効モデルを提案し、粘弾性項を導入すると、滑りの頻度分布に関して冪乗則が成り立たなくなることを示した。粉体に剪断をかけた系の速度の分布を調べ、それが粉体間の摩擦係数、および時間により液体的振る舞いから固体的振る舞いへ連続的に変化する可能性があることを示した。さらに粒子間および粒子-基盤（プレート）間の摩擦が重要な役割を果たす褶曲構造の形成に関して、それらの役割を明らかにした。

ランダムな表面での真実接触点の模式図



シミュレーションによって得られた褶曲構造の図。粒子と基盤間の摩擦係数の違いにより、構造に大きな変化が見られる



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 1件）

1. 著者名 Iwashita Wataru, Matsukawa Hiroshi, Otsuki Michio	4. 巻 72
2. 論文標題 Control of Static Friction by Designing Grooves on Friction Surface	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Tribology Letters	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11249-023-01822-4	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 Iwashita Wataru, Matsukawa Hiroshi, Otsuki Michio	4. 巻 13
2. 論文標題 Static friction coefficient depends on the external pressure and block shape due to precursor slip	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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） 10.1038/s41598-023-29764-w	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 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 松川宏
2. 発表標題 電荷密度波の滑り運動とシャピロステップ
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水柊汰, 鈴木岳人, 松川宏
2. 発表標題 付加体の圧縮場を模した粉粒体の力学的挙動の粒子間摩擦依存性
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩下航, 松川宏, 大槻道夫
2. 発表標題 摩擦界面の形状に対する静摩擦係数の依存性
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木岳人, 松川宏
2. 発表標題 バネ・ブロックモデルと熱・流体・空隙効果による微動の成因の理解
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木岳人, 松川宏
2. 発表標題 バネ・ブロックモデルと熱・流体・空隙相互作用に基づく微動の振る舞いの多様性の解析
3. 学会等名 第19回(2023年度)日本応用数理学会研究部会連合発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松川宏
2. 発表標題 スケールに依存する摩擦則
3. 学会等名 電気通信大学ナノトライボロジー研究センター 第4回 シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T Suzuki, H Matsukawa
2. 発表標題 Investigating the mechanism of the transition from slow to fast earthquakes using the BK model and interaction among heat, fluid pressure and porosity
3. 学会等名 AGU Fall Meeting Abstracts, 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩下航, 松川宏, 大槻道夫
2. 発表標題 マクロな物体形状の設計による静摩擦係数の制御
3. 学会等名 トライボロジー会議2022 秋 福井
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木岳人, 松川宏
2. 発表標題 BKモデルと熱・流体・空隙相互作用に基づくゆっくり - 高速地震遷移の多様性の理解
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木岳人, 松川宏
2. 発表標題 前震-本震系列の繰り返し周期の透水係数への依存性
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水 稔汰, 鈴木 岳人, 松川 宏
2. 発表標題 粉粒体の力学的挙動の粒子間摩擦依存性
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 岳人, 松川 宏
2. 発表標題 Condition for the transition from slow to fast earthquakes analyzed by the BK model with the interaction among heat, fluid pressure, and porosity
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 岳人
2. 発表標題 熱・流体圧・空隙率相互作用によるゆっくり地震から高速地震への遷移とその機構-バネ・ブロックモデルによる解析
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩下 航
2. 発表標題 3次元粘弾性体はどうやって滑りだすか - 前駆滑りと摩擦係数の挙動 -
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木岳人
2. 発表標題 BKモデルと熱・流体・空隙相互作用によるゆっくり・高速地震遷移条件の数理的解析
3. 学会等名 日本応用数理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩下航
2. 発表標題 粘弾性体はどうやって滑りだすか -前駆滑りと摩擦係数の挙動
3. 学会等名 日本表面真空学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩下航
2. 発表標題 大きなものはどうやって滑りだすか -前駆滑りと摩擦係数の挙動
3. 学会等名 日本トライボロジー学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松川宏
2. 発表標題 Friction across the scale -from atom to earthquake-
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会 International symposium on Friction beyond Scale, Materials, and Interfaces (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 遠藤峻兵, 西尾泉, 鈴木岳人, 松川宏
2. 発表標題 回転型実験装置による粉体の摩擦実験
3. 学会等名 日本物理学会第76回年会
4. 発表年 2021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
研究協力者	鈴木 岳人 (Suzuki Takehito) (10451874)	高千穂大学・人間科学部・准教授 (32637)	
研究協力者	大槻 道夫 (Otsuki Michio) (30456751)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授 (14401)	

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