

令和 2 年 5 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：2017～2019

課題番号：17K05586

研究課題名(和文) 摩擦と滑りの物理

研究課題名(英文) Physics of Friction and Sliding

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：最大静摩擦力以下の駆動力を加えた場合、マクロな系は静止していると一般には考えられているが、前駆滑りが起こる。速度依存性が非単調な動摩擦力を持つ粘弾性体ブロックに外力を加えた場合の前駆滑り、および定常滑りの様子を数値計算、解析計算により明らかにした。円筒に巻き付くベルトの摩擦はオイラーによって考察され、今日その結果は広く使われている。その理論ではいくつかの重要な仮定を用いているが、仮定であるということすら認識されることはない。粘弾性体ブロックの前駆滑りの研究を通じてベルトも前駆滑りを起こすはずであり、それは系全体の摩擦の振る舞いに大きな影響を与えると考え、数値計算により予想通りの結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的な認識とは異なり、最大静摩擦力以下の駆動力可でも前駆滑りが起こる、ということを解析的にも示すことができた意義は大きい。円筒に巻き付くベルトの摩擦は、ベルトドライブの様々な機械などで広く現れる重要な問題である。これまでオイラーの理論に基づく結果が広く信じられてきたが、それを拡張する結果を得られたことは実用的にも重要である。

研究成果の概要(英文)：When a driving force below the maximum static friction force is applied, the macroscopic system is generally considered to be at rest, but a precursor slip occurs. Numerical and analytical calculations were carried out to clarify the precursor and steady-state sliding of a viscoelastic block with non-monotonous velocity-dependent kinetic frictional forces when external forces were applied. The friction of a belt wrapped around a cylinder was considered by Euler and the results are widely used today. The theory makes use of several important assumptions, but they are never even recognized as being assumptions. Through the study of the precursor sliding of the viscoelastic block, we thought that the belt should also cause precursor sliding, which would have a significant effect on the friction behavior of the whole system, and we obtained the expected results by numerical calculations

研究分野：物性物理、トライボロジー、摩擦の物理、地震

キーワード：摩擦 前駆滑り オイラー理論

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地震は断層における摩擦と深い関係を持つ現象である。申請者はこれまで、解析計算、数値実験、実験を合わせて行い、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して研究を行ってきた。あわせてスプリング-ブロックモデルやその時間発展を離散化した OFC モデルに基づく地震の研究、地震と大きな関係を持つ粉体の摩擦の研究も行ってきた。

摩擦の研究においては、剛体基盤上の粘弾性体では摩擦係数は荷重とともに減少する場合があること、その原因は系全体が滑る前に起こる局所的前駆滑りであることを、2次元有限要素法の計算ならびに1次元有効モデルに基づく解析計算により示した[16、18]。マクロな弾性体の後端の滑り面から有限の高さの部分を徐々に押していくと、トルクのため後端底面の圧力が下がりその後端から準静的な前駆滑りが成長し、前駆滑りの前端がある臨界長に達すると動的で速い前駆滑りが現れ、その後、系全体が滑る。臨界長が系全体の摩擦係数を決定し、臨界長が荷重に依存するので摩擦係数も荷重に依存する。この数値的・理論的研究の結論はその後、実験によって確認された[8、12]。同様な現象な巨視的な系では不可避な荷重・駆動条件の不均一性のため、高い確率で起こると考えている。これらの現象は、前震から本震に至る地震サイクルと強い類似性がある。特に3種類の前駆滑りが現れるが、そのうちの一つは準静的な前駆滑りでありスロースリップイベントと見なすことができる。この準静的な前駆滑りが不安定化し本震に直接つながる前震へと遷移する条件は我々の1次元モデルでは解析的に得ることができる。しかし、余震に対応した現象は見つかっておらず、その理由は不明である。一方、実験及び他のモデルによる数値計算による研究では前駆滑りはより多様な振る舞いを示すが、その機構は不明である。モデルのどの特徴が結果の違いをもたらすのかも明らかではない。また前駆滑りから系全体の滑りに至る過程は、破壊において臨界核の大きさに達すると急激に進展する亀裂伝搬とも密接な関係があるが、その関係を追求する研究も行われているが、両者の統一的描像が得られているわけではない。

スプリング-ブロックモデルによる地震の研究も多く行われているが、多くは空間の次元および運動の次元がともに1次元の系についてである。ここで空間の次元とはブロックが存在する空間の次元を指し、運動の次元とはブロックが運動できる空間の次元である。空間の次元を2次元としたモデルの研究も近年、我々のものを含め幾つか行われており、そこでは次元による違いが現れているものの、詳細な研究はまだ行われていない。運動の次元については、その重要性はほとんど認識されておらず、特にその次元を2以上としたときに現れ得る有限のポアソン比の効果は全く不明である。一般にスプリング-ブロックモデルのような非線形系において系の振る舞いは上記の2種類の次元性に強く依存し、特に相転移の臨界指数に対応するグーテンベルグ-リヒター則に現れる $b$ 値は大きく影響を受けると考えられるが、次元性と $b$ 値の関係に注目した詳細な研究はほとんど無い。また、次元性は固有地震的振る舞いにも影響を与えると考えられるが、その影響も不明である。一方、実際の断層は当然、不均一性を有するが、それが自発的に発生する可能性もある。すなわち均質なスプリング-ブロックモデルにおいて一様な初期配置から出発しても系に内在するカオス性のため、不均一性が生じる可能性が高い。そのような不均一性のみで、実際の現象のどこまでが説明できるのか、外から加えた不均一性によって初めて現れる現象は何か、という問題は極めて興味深い、今のところはその解答の手がかりすら得られていない。

### 2. 研究の目的

以下の研究により現実の現象を説明するミニマルなモデル・条件を明らかにする。

- ・1次元粘弾性体のモデルではスロースリップイベントと見なせる準静的な前駆滑りが現れ、それが不安定化し系全体が滑る本震につながる高速前駆滑りへと遷移する。しかし、十分大きな系では本震が系全体に広がらず途中で止まる可能性があり、その場合、様々な強さの本震を生むことになる。また、実験および他の数値計算ではより多様な前駆滑りが観測されている。これらの可能性・条件を数値的に明らかにする。さらにこの研究では何らかの局所的な摩擦則を仮定する必要があるが、局所的な摩擦則と前震と見なせる前駆滑り・本震との関係をも数値的に解明する。

- ・空間、運動の次元性を変えたスプリング-ブロックモデルの数値的研究により滑り領域の前端の滑り速度、地震の頻度分布、余震などへの次元性、摩擦の効果を数値的に明らかにする。空間、運動の次元が2次元以上の場合に、有限のポアソン比を持つモデルとポアソン比が0のモデルが可能である。ポアソン比の効果にも注目する。

- ・均一なモデルで一様な初期配置から出発し、自発的に生じる時空間の不均一性を最大リヤプノフ指数、およびリヤプノフベクトルを求めることにより、明らかにする。さらに自発的に生じる

不均一性のみから現れる現象と外から不均一性を加えて初めて現れる現象とを明らかにする。

### 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、固体界面の摩擦、および、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図る。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。

### 4. 研究成果

マクロな系に駆動力を加えた場合、一般には最大静摩擦力以下では静止していると考えられているが、前駆滑りが起こる。速度依存性が非単調な動摩擦力を持つ粘弾性体ブロックに外力を加えた場合の前駆滑り、および定常滑りの様子を数値計算、解析計算により明らかにした。円筒に巻き付くベルトの摩擦はオイラーによって考察され、今日その理論は多くの場所で使われている。しかしその理論ではベルトの伸縮は無視し、またベルトが円筒上を滑り出す直前はベルトと円筒の接している各点で摩擦応力は最大静摩擦応力に等しいという仮定を用いている。そのような仮定を超えた研究は国内外においても少なく、特に後者は仮定であるということすら認識されることはない。粘弾性体ブロックの前駆滑りの研究を通じてベルトも前駆滑りを起こすはずであり、それは系全体の摩擦の振る舞いに大きな影響を与えると考えるに至った。数値計算を行っており予想通りの結果を得た。

速度状態変数依存摩擦則を微視的モデルから出発し導出し、低速度極限まで成り立つ摩擦則の式を得た。そして、いわゆる直接項(A項)が支配的な場合、低速度極限では摩擦力は0をなることを示した。これは直接項が支配的な場合、十分小さな駆動力下でも熱揺らぎにより滑り運動が可能となるからである。間接項(B項)が支配的な場合も、真実接触面積は見掛けの接触面積より大きくなれないことを考慮すると、低速度極限では摩擦力は0となる。これより十分低速度で摩擦が小さくなることは極めて一般的であると考えられる。

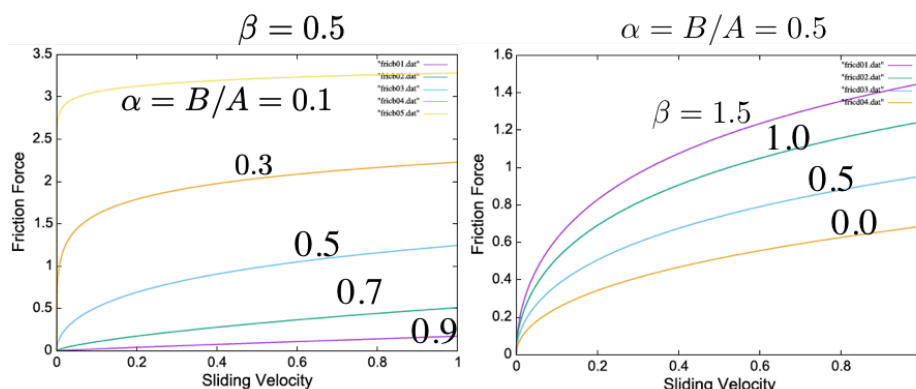


図 1. 摩擦力の速度依存性。  $\beta$  はアスペリティのサイズ分布がべき乗で表されるとした場合のべきである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Suzuki, T., & Matsukawa, H	4. 巻 88
2. 論文標題 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 114402-114410
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松川宏
2. 発表標題 濡らした砂の摩擦
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松川 宏
2. 発表標題 Amontons' law between randomly rough surfaces
3. 学会等名 6th World Tribology Congress (WTC 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松川 宏
2. 発表標題 謎は残る。砂の摩擦と膨張
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1回 シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松川 宏
2. 発表標題 Sliding Friction and Dilatancy of Wet Sand
3. 学会等名 サステイナブルトライボロジー会議2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松川 宏
2. 発表標題 乱れた粗い表面の静摩擦係数の理論
3. 学会等名 トライボロジー会議2017秋
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松川 宏
2. 発表標題 乱れた粗い表面の静摩擦係数の理論
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi MATSUKAWA
2. 発表標題 Friction Law Depends on the Scale
3. 学会等名 International Nanotribology Forum Chiang Rai, Thailand 2020 Atomic/Molecular Insights into Tribological Processes in memoriam Jacob Israelachvili (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松川宏
2. 発表標題 速度・状態依存摩擦則の導出と静摩擦力
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋期大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 松川 宏 他全142名	4. 発行年 2018年
2. 出版社 テクノシステム	5. 総ページ数 1192
3. 書名 数値解析と表面分析によるトライボロジーの解明と制御	

〔産業財産権〕

〔その他〕

青山学院大学工学部松川研究室 <a href="http://www.phys.aoyama.ac.jp/~w3-matsu/Top.html">http://www.phys.aoyama.ac.jp/~w3-matsu/Top.html</a>
---

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