

平成 22 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006 ～ 2009

課題番号：18540381

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

研究成果の概要（和文）：様々な界面摩擦および固体内摩擦現象の理論的、数値的、実験的研究によりそれらの多様性を明らかにした。特に、最も単純な摩擦系と考えられる清浄表面の摩擦においても多様な振る舞いが生じ、それらは構造と大きな関係があること、ナノスケール潤滑剤層においても同様の事が言えることを見いだした。巨視的摩擦現象である地震については、その大きさの分布が冪乗則に従うことはよく知られているが、この振る舞いがある条件下では粉体をモデルとした実験により再現されることを明らかにし、さらに現象論的モデルの数値実験により、その分布はサイズ依存性を示し、大きな系では冪乗則からのずれが顕著になることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We have studied various frictional phenomena at interface and in bulk by theoretical, numerical and experimental technique. It turned out that atomically clean surface, which is one of the most simple frictional systems, shows various novel phenomena related to the structure of the system. Lubrication layer of nanoscale also shows similar behavior. It is well known that the size distribution of earthquake shows power law. We demonstrated that the model experiment using granular systems reproduces the power law under certain condition. The numerical simulation based on phenomenological model shows that the size distribution depends on the size of the system and the deviation from the power law grows for larger systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,900,000	0	1,900,000
2007 年度	500,000	150,000	650,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,700,000	540,000	4,240,000

研究分野：物性物理学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：摩擦、潤滑、地震、トライボロジー、ナノトライボロジー、ピン止め

## 1. 研究開始当初の背景

固体間の滑り摩擦は最も身近な物理現象の一つであり古くから研究が行われてきたが、多くの基本的な問題が未解決のまま残されている。しかし、近年では超高真空技術などの発展により表面の制御も可能となり、摩擦顕微鏡など新たな実験手段が開発され、マイクロ・ナノスケールの摩擦の研究が始まっている。しかし、そのようなスケールから出発し、マクロスケールの摩擦を理解することは未だなされていない。

## 2. 研究の目的

本計画では、階層構造をなす異なるスケールの界面摩擦を、それぞれのスケールに適した有効モデルを構築しそれを解析し、次にそれらを結びマイクロレベルからのマクロ摩擦機構の解明を図る。また、界面摩擦に類似の現象は、密度波や超伝導体中の磁束格子のピン止めと運動など、固体内でも観測される。これら多様な系の摩擦現象には多くの共通する性質（普遍性）と各々の個性がある。しかし、その普遍性と個性の物理に関しても基本的な多くの問題が未解決である。固体内摩擦系を含めた総合的研究を行い、摩擦現象の動的相図を完成し摩擦機構の統一的理解に挑む。摩擦の普遍性と多様性を明らかにし、摩擦の予測及び新たな摩擦制御技術の創成を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 乱れない結晶表面でのマイクロ・メゾスケールの滑り摩擦はある意味、最も単純な摩擦であり、摩擦の素過程と考えられる。数値計算および実験との比較により、摩擦の素過程の解明を図る。ナノマシンへの応用の可能性も探る。

(2) 介在物のある摩擦の統一的理解  
2つの物質間に、潤滑剤などの介在物がある場合の摩擦は様々な場面で現れ、スティック・スリップ現象など多様な振るまいを示す。これまでに介在物のある摩擦の有効モデルを作り、それに基づきこの系の摩擦機構解明について大きな成果を挙げた。数値計算を進め摩擦の相図を作り、実験との対応を探る。層状構造の有無が摩擦に与える影響を調べ、介在物のある摩擦の統一的理解を図る。

(3) 地震におけるべき乗則（グーテンベルグ・リヒター則）の普遍性クラスの研究  
地震は断層が起すスリップであり摩擦現象のひとつである。また、断層の間にガウジと呼ばれる岩くずがあることが知られており、介在物のある摩擦系の一例である。地震の頻度分布においてはグーテンベルグ・リヒター則とよばれるべき乗則が成り立つことが知られており、またこの振るまいを再現するモデルとしてある種のスプリング・ブロックモデルも提案されている。しかし、そのべき乗則の成立がどこまでモデルの詳細に依存するのか、べき乗則の指数を決めるものは何かなど

基本的な問題については、全くといって良いほどわかっていない。モデルの次元性、自由度の大きさ、通常は現象論的に与えられるブロックと基盤間の摩擦の振るまいなどを系統的に変えたモデルを調べ、べき乗則（グーテンベルグ・リヒター則）の普遍性クラスの解明を目指す。

## 4. 研究成果

(1) 乱れない清浄表面間の摩擦は表面の結晶軸の相対角度に依存し、滑り方向の格子定数の比が無理数のとき、すなわちインコメンシュレートのとき、摩擦力が小さくなることが知られている。しかし、結晶軸の相対角度が固定されていない場合、系がどのように振る舞うかは不明であった。この問題を清浄表面上の原子クラスター、および吸着膜系について調べ、運動速度が大きい場合、ある遷移時間後には系は自発的にインコメンシュレートな構造をつくる事を計算機実験によって明らかにした。その遷移時間はある臨界速度あるいは臨界外力（最大静摩擦力）に向けて発散する相転移的振る舞いを示す。

(2) 乱れない清浄表面上でのナノマシンの駆動機構を論じた。空間的に対称な基板上の粒子鎖モデルにおいて、粒子間相互作用の自然長を時間空間的に振動させることにより、方向を持った運動が可能となること、その方向は初期条件などには依らないが、振動の周期などのパラメーターに依存すること、断熱運動および準断熱運動状態では時間平均した運動の速度はある基本速度の整数倍の値に量子化され、そのため広いパラメータ領域で速度ロッキングが起こること、等を明らかにした。ナノマシンの運動機構としても重要な結果である。

(3) ナノ潤滑剤層の摩擦の計算機実験古典分子動力学法により数分子層の潤滑剤の振るまいを調べ、摩擦力が潤滑剤分子と基盤との相互作用の強さに対して非単調に変化すること、これは潤滑剤層の構造変化によることを明らかにした。潤滑剤分子の設計の観点からも興味深い結果である。

(4) プレート間地震のモデルであるバネ・ブロックモデルの計算機実験により、このモデルでの地震の頻度分布が小さなサイズの系ではべき乗則に従うが、サイズの増大とともにそれからのずれが大きくなることを示し、現実の地震の観測データとの関連を論じた。

## (5) 粉体の摩擦と地震

地震は滑り面に介在物のある摩擦現象の一種であり、その振るまいを理解する上で粉体系の摩擦が良いモデル系となる。アルミナボールを用いた粉体摩擦の実験を行い、スリップの大きさの分布がべき乗則にのることを見いだした。この系は潤滑のモデルともなり、得られた結果はその文脈でも興味深い。

(6)  $MgB_2$ などの2ギャップ超伝導体では分数量子磁束が現れ得る事を示し、その運動を論じた。

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 6 件)

1. Hajime Yoshino, Hiroshi Matsukawa, Satoshi Yukawa and Hikaru Kawamura: "Non-linear rheology of layered systems—a phase model approach.", Proc. of International Conference on Science of Friction, 9-13 Sep. 2007, Irigo, Japan, J. of Physics: Conference Series, Vol.89, 012014, p.1-10 (2007) (査読有り)
2. Tatsuro Saito and Hiroshi Matsukawa: "Size dependence of the Burridge-Knopoff model.", Proc. of International Conference on Science of Friction, 9-13 Sep. 2007, Irigo, Japan, J. of Physics: Conference Series, Vol.89, 012016, p.1-7 (2007) (査読有り)
3. Hiroshi Matsukawa, Kazuhiro Haraguchi and Shinsuke Ozaki: "Numerical study of friction of flake and adsorbed monolayer on atomically clean substrate.", Proc. of International Conference on Science of Friction, 9-13 Sep. 2007, Irigo, Japan, J. of Physics: Conference Series, Vol.89, 012007, p.1-9 (2007). (査読有り)
4. Jun Goryo, Tatsuro Saito and Hiroshi Matsukawa: "Vortex pinning in two-gap superconductors.", Proc. of International Conference on Science of Friction, 9-13 Sep. 2007, Irigo, Japan, J. of Physics: Conference Series, Vol.89, 012022, p.1-5 (2007) (査読有り)
5. Jun Goryo, Singo Soma and Hiroshi

Matsukawa: "Deconfinement of Vortices with Continuously Variable Fractions of the Unit Flux Quanta in Two-Gap Superconductors.", Europhysics Letters, Vol.80, 17002, p1-5 (2007). (査読有り)

6. Hiroshi Matsukawa and Tatsuro Saito: "Friction, Stick-Slip Motion and Earthquake.", Modelling Critical and Catastrophic Phenomena in Geoscience: A Statistical Physics Approach, Springer Lecture Notes in Physics, Vol.705, p.169-189 (2006). (査読有り)

[学会発表] (計 24 件)

1. 川口高明・松川宏、「ナノ潤滑現象のダイナミクス」、日本物理学会 2010 年春季大会、2010 年 3 月 21 日、岡山大学津島キャンパス
2. 松川宏、「ナノ界面における摩擦・潤滑現象」、摩擦の科学国内会議、2009 年 12 月 5 日、名古屋国際会議場
3. Hiroshi Matsukawa, Toshiya Asakura, Kazuhiro Haraguchi: "Friction on Atomically Clean Substrate", World Tribology Congress 2009, 2009.9.6-11, Kyoto International Conference Center
4. Takaaki Kawaguchi, Hiroshi Matsukawa: "Interfacial Friction and Related Tribological Phenomena at Nanoscale", World Tribology Congress 2009, 2009.9.6-11, Kyoto International Conference Center
5. Masakazu Odagiri, Hiroshi Matsukawa, Norihiro Uehara: "Numerical Study of Thin

Lubricant Layer Based on Langevin Method” ,  
World Tribology Congress 2009,  
2009. 9. 6-11, Kyoto International  
Conference Center

6. 川口高明・松川宏、「ナノ摩擦現象と潤滑のダイナミクスV」、日本物理学会 2009 年春季大会、2009 年 3 月 30 日、立教大学

7. 松川宏、「マクロスケールから巨大スケールの摩擦：紙、岩石から地震へ」、第 28 回表面科学学術講演会、2008 年 11 月 13 日、早稲田大学

8. 川口高明・松川宏、「ナノ摩擦現象と潤滑のダイナミクスIV」、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 23 日、岩手大学

9. 松川宏、「アルミナボールを用いた粉体摩擦の実験」、摩擦の科学国内会議、2008年9月13日、愛知教育大学

10. 松川宏、「摩擦の理論」、日本応用物理学会シンポジウム「トライボロジー研究の最前線 -摩擦の物理と応用-」、2008 年 9 月 2 日、中部大学

11. 松川宏・原口和宏・尾崎信介、「清浄表面上のクラスターおよび吸着膜の運動と摩擦」、日本物理学会 2008 年春季大会、2008 年 3 月 25 日、近畿大学大学本部キャンパス

12. 増東俊介・松川宏、「アルミナボールを用いた粉体層の摩擦」、日本物理学会 2008 年春季大会、2008 年 3 月 25 日、近畿大学大学本部キャンパス

13. 齋藤達朗・松川宏、「拡張Burridge-Knopoffモデルの解析」、日本物理学会 2008

年春季大会、2008 年 3 月 25 日、近畿大学大学本部キャンパス

14. 川口高明・松川宏、「ナノ摩擦現象と潤滑のダイナミクスIII」、日本物理学会 2008 年春季大会、2008 年 3 月 25 日、近畿大学大学本部キャンパス

15. 吉野元・松川宏・湯川諭・川村光、「層状構造をもつ系における非線型レオロジー」、日本物理学会 2007 年秋季大会、2007 年 9 月 24 日、北海道大学

16. 川口高明・松川宏、「ナノ摩擦現象と潤滑のダイナミクスII」、日本物理学会 2007 年秋季大会、2007 年 9 月 24 日、北海道大学

17. Hiroshi Matsukawa: “Dependence of maximum static friction on waiting-time using dynamics of Vortices in superconductors”, International Conference on Science of Friction, 9-13 Sep. 2007, Irigo, Aichi

18. 吉野元・松川宏・湯川諭、「潤滑剤摩擦系の位相模型」、日本物理学会 2007 年春季大会、2007 年 3 月 18 日、鹿児島大学郡元キャンパス

19. 御領潤・松川宏、「2-ギャップ超伝導体における 2 種の分割渦の非閉じ込め転移」、日本物理学会 2007 年春季大会、2007 年 3 月 18 日、鹿児島大郡元キャンパス

20. 高宮浩生・松川宏、「パルス幅記憶効果の計算機実験」、日本物理学会 2007 年春季大会、2007 年 3 月 18 日、鹿児島大学郡元キャンパス

21. 原口和宏・松川宏、「Lennard-Jones モ

デルによる吸着膜の滑りの計算機実験 II」、  
日本物理学会 2007 年春季大会、2007 年 3 月  
18 日、鹿児島大学郡元キャンパス

22. 高宮浩生・松川宏、「多次元モデルにお  
ける Phase Organization とパルス幅記憶効  
果」、日本物理学会 2006 年秋季大会、2006 年  
9 月 23 日、千葉大学西千葉キャンパス

23. 齋藤達朗・松川宏、「Burridge-Knopoff  
モデルのサイズ依存性 III」、日本物理学会  
2006 年秋季大会、2006 年 9 月 23 日、千葉大  
学西千葉キャンパス

24. 原口和宏・松川宏、「Lennard-Jones Model  
による吸着膜の滑りの計算機実験」、日本物  
理学会 2006 年秋季大会、2006 年 9 月 23 日、  
千葉大学西千葉キャンパス

〔図書〕（計 2 件）

1. 日高芳樹・甲斐昌一／松川宏、培風館、「液  
晶のパターンダイナミクス／滑りと摩擦の  
科学」、2009 年、228

2. 松川宏、丸善株式会社、「表面物性工学ハ  
ンドブック第 2 版」、2007 年、1064

## 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

御領 潤 (GORYO JUN)  
東京大学・生産技術研究所・特任講師  
研究者番号：70365013  
(H18→H19)