

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540398

研究課題名(和文) 滑りと摩擦の物理

研究課題名(英文) Physics of Sliding and 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) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：弾性体の数値実験および解析計算により、静摩擦係数がアモントンの法則に従わず荷重とともに減少し、見かけの接触面積にも依存すること、この原因は最大静摩擦力以下で起こる局所的前駆滑りによるものであることを明らかにした。この結果は実験と矛盾しない。基盤間に挟まれた粉体の摩擦を離散要素法により調べ、そのスリップサイズの分布がある場合にはべき乗則に従うことなどを示した。また実験でも同様の結果を得た。数分子層の高分子潤滑剤の振る舞いを分子動力学法により調べ、潤滑剤分子集団の構造と摩擦の関係を明らかにした。バイオリンの弦と弓の摩擦と発する音の関係を実験および数値計算により明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Based on numerical experiment and analytic calculation, we showed that the static friction coefficient is not proportional to the loading force and depends on the apparent contact area. These behaviors indicate the breakdown of the Amontons' law, result from precursor slip before the onset of bulk sliding, and is consistent with experiments. Frictional behavior of granular particles confined between substrates were investigated numerically. The slip-size distribution obeys power law under certain condition. Similar results were obtained also in experiments. The peculiar frictional phenomena of lubricant molecules with a few molecular thickness were investigated numerically. The friction has strong relation with the structure of lubricant molecule layers. By real and numerical experiments the relation between the friction of bow and string in violin and the sound was investigated.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：摩擦 潤滑 粉体 地震 スティックスリップ 冪乗則 物性基礎 トライポロジー

1. 研究開始当初の背景

摩擦は最も身近な物理現象の1つであり、古代から研究されてきたが、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、近年の新たな実験技術・装置の開発、計算機実験の進歩などにより、原子・分子スケールの摩擦を調べることも可能となり、摩擦研究は新たなステージに突入している。ミクロスケールの摩擦の解明はナノテクノロジーの成功の可否を握ると言っても過言ではなく、その研究は現在、活発に行われている。一方、巨視的なスケールの物体の摩擦に関しては、最初ダヴィンチが発見し、その約200年後アモントンにより再発見されたアモントンの法則が広い範囲で良く成り立つと考えられてきた。しかしこれに関しても、新たな測定技術を用いた実験によりその妥当性に関して多くの問題が指摘されており、その解決は学術的にも実用上も極めて重要なものである。

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いる。そして、摩擦を物性科学の新しい手段、視点により研究するための環境は急速に整いつつある。

2. 研究の目的

固体間の滑り摩擦は古く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、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、ナノ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、摩擦の普遍性と多様性の機構を明かにすることによって、摩擦の基礎的・統一的描像を確立する。さらに、その成果を工学上の問題に展開する。実験的研究も行う。

3. 研究の方法

本研究では、摩擦をミクロレベルから調べマクロスケールの摩擦の挙動の解明に結びつける。そのため、対象により、数値的方法、理論的解析的方法、実験的方法を適宜使い、それらを総合して目的の達成を図る。

4. 研究成果

弾性体の数値実験およびに解析計算により、静摩擦係数がアモントンの法則に従わず荷重とともに減少し、見かけの接触面積にも依存すること、この原因は最大静摩擦力以下で起こる局所的前駆滑りによるものであることを明らかにした。この結果は実験と矛盾しない。基盤間に挟まれた粉体の摩擦を離散要素法により調べ、そのスリップサイズの分布がある場合にはべき乗則に従うことなどを示した。また実験でも

同様の結果を得た。数分子層の高分子潤滑剤の振る舞いを分子動力学法により調べ、潤滑剤分子集団の構造と摩擦の関係を明らかにした。1つの真実接触点の振る舞いを数値実験により調べ、巨視的なスケールの摩擦の解明につながる成果を得た。バイオリンの弦と弓の摩擦と発する音の関係を実験および数値計算により明らかにした。

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 17 件)

1. T. Kawaguchi and H. Matsukawa, "Directed Motion and Novel Dynamics of Interfacial Systems", Proc. of the 12th Asia Pacific Physics Conference, JPS Conf. Proc., 012059 (4pages) (2014) (査読有り).
2. M. Otsuki and H. Matsukawa, "Systematic Breakdown of Amontons' Law of Friction for an Elastic Object Locally Obeying Amontons' Law", Scientific Reports **3**, 1586 [6 pages] (2013) (査読有り).
3. T. Kawaguchi and H. Matsukawa, "Complex dynamics and directed transport of particles at a nanoscale interface", Proc. of the 4th Int. Symp. on Slow Dynamics in Complex Systems, ed. by M. Tokuyama and I. Oppenheim, AIP Conf. Proc. **1518**, p.737-740 (2013) (査読有り).
4. 大槻道夫, 松川宏 「摩擦界面での局所前駆すべりとアモントン則の破れ」, トライボロジスト **58**, p.57-64 (2013) (査読無し).
5. H. Hayakawa and M. Otsuki, "Nonequilibrium identities and response theory for dissipative particles", Phys. Rev. **E88**, 032117 [9 pages] (2013) (査読有り).
6. 松川宏 「トライボロジー入門 (V) 潤滑, 及び摩擦研究の最近の話題」, 日本画像学会誌 **51**, p.314-319 (2012) (査読無し).
7. 松川宏 「トライボロジー入門 (IV) 原子・分子スケールの摩擦」

- 日本画像学会誌 51 , pp.223-230 (2012) (査読無し) .
8. 松川宏
「トライボロジー入門 (III) マクロ系の摩擦(その2) 」
日本画像学会誌 51 , pp.92-98 (2012) (査読無し) .
 9. M. Otsuki and H. Hayakawa,
“ Critical scaling of a jammed system after a quench of temperature ”,
Phys. Rev. E86, 031505 [6 pages] (2012) (査読有り) .
 10. M. Otsuki and H. Hayakawa,
“ Rheology of sheared granular particles near jamming transition ”
Prog. Theor. Phys. Suppl. 195, p.129-138 (2012) (査読有り) .
 11. 松川宏
「トライボロジー入門 (II) マクロ系の摩擦(その1) 」,
日本画像学会誌 50 , p.563 - 568 (2011) (査読無し) .
 12. 松川宏
「トライボロジー入門 (I) 序論 」,
日本画像学会誌 50 , p.475- 482 (2011) (査読無し) .
 13. M. Otsuki and H. Hayakawa,
“ Critical scaling near jamming transition for frictional particles ”,
Phys. Rev. E83, 051301 [9 pages] (2011) (査読有り) .
 14. S. Inagaki, M. Otsuki and S-i. Sasa,
“ Protocol dependence of mechanical properties in granular systems ”,
Euro. Phys. J. E34, 124 [6pages] (2011) (査読有り) .
 15. S.-H. Chong, M. Otsuki and H. Hayakawa,
“ Generalized Green-Kubo relation and integral fluctuation theorem for driven dissipative systems without microscopic time reversibility ”,
Phys. Rev. E81, 041130 [4pages] (2010) (査読有り) .
 16. H. Hayakawa, Song-Ho Chong and M. Otsuki ,
“ Nonequilibrium liquid theory for sheared granular liquids ”,
Proc. of IUTAM-ISIMM Symp. on Mathematical Modeling and Physical Instances of Granular Flow, ed. by J. D. Goddard , J. T. Jenkins and P. Govine, AIP Conf. Proc. 1227, p.19-30 (2010) (査読有り) .
 17. M. Otsuki, H. Hayakawa and S. Luding,
“ Divergence of pressure and viscosity for hard and soft granular materials ”,
Prog. Theor. Phys. Suppl. 184 , p.110-133 (2010) (invited paper) (査読有り) .
- [学会発表](計 32 件)
1. 加藤弘気, 松川宏, 大槻道夫
「単一微小突起の接触・引き離し・せん断破壊による摩擦」
日本物理学会第 69 回年次大会、平塚、2014 年 3 月
 2. 片野祐, 角直広, 前川覚, 田所千治, 中野健, 大槻道夫, 松川宏
「弾性体の滑り摩擦における前駆滑りと摩擦係数 III」
日本物理学会第 69 回年次大会、平塚、2014 年 3 月
 3. 松川宏、招待講演、
“ Science of Friction ”
科学研究費特別推進研究「MEMS と実時間 TEM 観察によるナノメカニカル特性評価と応用展開」終了報告シンポジウム、東京、2014 年 1 月
 4. H. Kato, M. Otsuki and H. Matsukawa,
“ Numerical Experiments on the Dynamics of Sheared and Pulled-Off Single Actual Contact Point and Origin of Sliding Friction ”
ACSIN-12 & ICSPM21, Tsukuba, 2013.11.
 5. 松川宏、招待講演、
「摩擦の法則と前駆滑り」
第 5 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム、仙台、2013 年 11 月
 6. 片野祐, 角直広, 前川覚, 田所千治, 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滑りとアモントン則の破れ」,
トライボロジー会議 2013 秋、福岡、2013 年 10 月
 7. 西尾幸祐, 川瀬雄哉, 大槻道夫, 松川宏
「剪断された 2 次元粉体におけるスリップサイズ分布のスケーリング則」
日本物理学会年秋季大会、徳島、2013 年 9 月
 8. 加藤弘気, 大槻道夫, 松川宏

- 「微小突起の接触・引き離し・せん断破壊、摩擦」
日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島、
2013 年 9 月
9. 片野祐, 角直広, 前川覚, 田所千治, 中野健, 大槻道夫, 松川宏
1 「弾性体の滑り摩擦における前駆滑りと摩擦係数 II」
日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島、
2013 年 9 月
10. 川口高明, 松川宏
「固体表面におけるナノマシンのダイナミクス」, 日本物理学会年秋季大会、
徳島、2013 年 9 月
日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島、
2013 年 9 月
11. 片野祐, 角直広, 前川覚, 田所千治, 中野健, 大槻道夫, 松川宏
1 「弾性体の滑り摩擦における前駆滑りと摩擦係数」
日本物理学会第 68 回年次大会、広島、
2013 年 3 月
12. 大槻道夫, 松川宏
「弾性体の摩擦界面における局所滑りのパターン」,
日本物理学会第 68 回年次大会、広島、
2013 年 3 月
13. 宇都宮翔, 荒井賢, 安土広志, 松尾繁一, 大槻道夫, 松川宏
1 「剪断されたナノスケール潤滑剤層の摩擦」
日本物理学会第 68 回年次大会、広島、
2013 年 3 月
14. 大槻道夫, 松川宏,
「剪断弾性体でのアモントン則の破れと局所スリップの伝搬」
トライボロジー会議 2012 年春、2012 年
5 月
15. 大槻道夫, 松川宏
1 「剪断弾性体における地震サイクル」
日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜、
2012 年 9 月
16. 日下義規, 野村健斗, 大槻道夫, 松川宏
「ヴァイオリンの弦の振動と弓との摩擦」
日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜、
2012 年 9 月
17. 嵐博隆, 大槻道夫, 松川宏
「回転型実験装置による粉粒体の摩擦実験と Stick-Slip 運動」
日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜、
2012 年 9 月
18. 片野祐, 大槻道夫, 松川宏
「線形滑り装置による粉粒体の摩擦実験」
日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜、
2012 年 9 月
19. 西尾幸祐, 荒金孝太郎, 大槻道夫, 松川宏
2 「粉体の摩擦シミュレーション」
日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜、2012 年 9 月
20. 宇都宮翔, 荒井賢, 安土広志, 松尾繁一, 大槻道夫, 松川宏
「剪断されたナノスケール潤滑剤層の計算機シミュレーション」
日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜、
2012 年 9 月
21. 川口高明, 松川宏
2 「ナノ界面の新奇なダイナミクスと摩擦・潤滑」現象
日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜、
2012 年 9 月
22. 大槻道夫
「摩擦、破壊、地震」
日本物理学会 第 67 回年次大会、西宮、
2012 年 3 月
23. H. Matsukawa and M. Otsuki
“Breakdown of Amontons’ Law of Friction in Sheared-Elastomer with Local Amontons’ Friction”
APS March Meeting, Boston, 2012.3
24. Michio Otsuki and Hiroshi Matsukawa,
“Propagation of rupture fronts at the interface between sheared-elastomers”
International Tribology Conference, Hiroshima, 2011.11.
25. H. Arashi, K. Aragane, S. Arai, K. Nishio, M. Otsuki and H. Matsukawa,
“Friction and stick-slip motion of granular materials; experiment and simulation “
International Tribology Conference, Hiroshima, 2011.11.
26. 松川宏,
「ピン止めとダイナミクスの多様性と普遍性」,
日本物理学会 2011 年秋季大会、富山、
2011 年 9 月
27. 川口高明, 松川宏,
「ナノ固体界面における摩擦及び潤滑現象」,
日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年

9月

28. 大槻道夫, 松川宏,
「ミクロな滑りとマクロな摩擦」,
日本物理学会 2011 年秋季大会、富山、
2011 年 9 月
29. Michio Otsuki,
“ Propagation of ‘ slip-wave ’ and
stick-slip motion in sliding friction
based on sheared-elastomer model ” ,
International Conference on Science
of Friction 2010, Mie, 2010.9
30. Hiroshi Matsukawa,
“ Structure and friction of lubricant
film; numerical study ” ,
International Conference on Science
of Friction 2010, Mie, 2010.9
31. Hiroshi Matsukawa,
“ Friction of granular materials;
experiment and simulation ” ,
International Conference on Science
of Friction 2010, Mie, 2010.9
32. 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 第 65 回年次大会、2010
年 3 月

〔図書〕(計 1 件)

1. 松川宏「岩波講座物理の世界 摩擦の物理」岩波書店、136 ページ (2012)

〔その他〕

ホームページ等

松川研究室ホームページ

<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

川口高明 (KAWAGUCHI, Takaaki)

東邦大学・医学部・教授

研究者番号：10273913

(3) 連携研究者

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