

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654119

研究課題名(和文) すべり摩擦現象における時空間揺らぎと自己組織化

研究課題名(英文) Spatio-temporal fluctuations and self-organization in sliding friction

研究代表者

山口 哲生 (Yamaguchi, Tetsuo)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20466783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：ゲルは、高分子からなるやわらかい弾性体であり、すべらせるとしばしばスティック-スリップ運動を起こす。ゲルのスティック-スリップ運動は、断層が一時的かつ局所的にすべりを起こす地震現象と類似した振る舞いを示すことから、地震現象のモデル系として用いられている。本研究では、実験条件によってスティック-スリップ運動の複雑性をコントロールできることを発見した。また、その場可視化を用いてスティック-スリップサイクルの中で巨大すべりがどのように“準備”されるかについて調べ、巨大すべり直前を特徴付ける物理量と実験パラメータとのスケーリング関係を見出した。

研究成果の概要(英文)：Gel is a soft and elastic material made of polymer, and exhibits so called stick-slip motions when it is slid against a counter surface. Gel is sometimes used as an analogue material of earthquake faults due to similarity in its dynamical behavior. In this study, we conducted friction experiments using gels and found that the complexity and spatio-temporal heterogeneity in stick-slip motions can be well controlled by experimental parameters. In order to understand its local dynamics, we performed in-situ optical observations of frictional interfaces. As a result, we found some scaling relations connecting physical quantities that describe slip occurrence and experimental parameters.

研究分野：統計物理学, ソフトマター物理学, 実験地震学

キーワード：地震 摩擦 ゲル スティックスリップ運動 その場可視化 不均一性

1. 研究開始当初の背景

高分子ゲル(ゲル)は、水などの溶媒を多量含み、溶質である高分子が架橋されたネットワーク状の構造を有する、やわらかい(弾性率 $G \sim 10^4 - 10^5 \text{Pa}$ 程度の)弾性体である。このようなやわらかい弾性体のすべり摩擦のメカニズムは、生体内の関節潤滑や、コンタクトレンズ・自動車用タイヤの開発など、さまざまな分野から関心を持たれている。これまでの研究によると、高分子の電荷・架橋度などの物性の変化や、界面活性剤など第3物質の添加により、すべりの性質が大きく変化することが知られている。また、ゲルはそのやわらかさから、時空間的に不均一なスティック スリップ運動を示すことも分かっている。例えば、ゼラチンゲルをガラス面上ですべらせると、破壊・凝着の対で構成されるパルスが摩擦界面を伝播する(Baumberger et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2002)。これは、地震現象の解析によって発見された self-healing slip pulse と類似の現象である。また、すべり面内で大小さまざまなすべりイベントが起こり、すべりの規模とその頻度との関係が冪(べき)則(地震学における Gutenberg-Richter 則)を示すことが見出されている(Yamaguchi et al., *J. Phys.* (2009), *J. Geophys. Res.* (2011))。これらのことは、ゲルのすべり摩擦と断層のすべりによって引き起こされる地震現象とが共通点を持つことを意味している。このように、ゲルや断層のすべり摩擦において、時空間的に不均一なスティック スリップ運動が生じることが知られていたが、それらの背後にあるメカニズムについてはよく分かっていなかった。

2. 研究の目的

上記のように、断層においてもゲルにおいても、時空間的に不均一なすべりを生じるが、このような不均一性はどのように生まれるか?それはどのように特徴付けられるか?これらの疑問に答えることが、本研究における主要な目的であった。

3. 研究の方法

摩擦実験装置の概略を Fig.1 に示した。初期傾き角 ϑ_0 、荷重 F_N でブロックをゲルプレートに押し付けた状態で、ゲルプレートを一定速度 ($V = 10 \mu\text{m/s}$) で水平移動させ、ブロック-ゲル間を摩擦させた。ロードセルを用いてブロックにかかる水平力を測定し、摩擦力とした。上側のブロックには、40mm(すべり方向) x 100mm(直交方向) x 20mm(厚み)のサイズのアクリル樹脂(PMMA)を用いた。また、下側のプレートとして、シリコンゲル(SILPOT184・CY52-276 混合物, 東レダウコーニング, 200mm x 200mm x 20mm(厚み))を作成した。ゲルのせん断弾性率 G は 110KPa 程度であった。

ブロックとゲルとの接触状態を可視化するため、ビデオカメラで側面から撮影した。

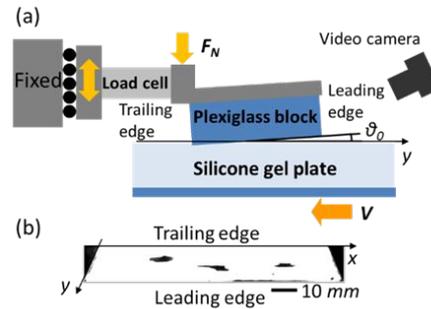


Fig.1: (a) 実験装置の概略図(b)画像の例。

画像処理を行なうことで、接触状態の2値化を行ない、摩擦力の時間変化との対応やスティック スリップの動力学を議論した。

4. 研究成果

結果の一例として、Fig.2 に、さまざまな初期傾き角 ϑ_0 における摩擦力の時間変化および時空間プロット(すべりに直交する方向に関して平均化したもの。明るいほど接触状態がよいことを表す)を示した。アクリルブロックとゲルプレートとの初期傾き角を変化させることで、スティック スリップ運動に大きな違いが現れている。特に、ある傾き角(Fig.2(c)参照)を取るところで、規則的かつ巨大なスリップが出現することが分かった。これは、適切な初期傾き角に設定することで、Trailing edge (Fig.1 参照)付近の法線応力を高めて小中規模のスリップの発生を抑制しつつ、接触面積がブロック全域に渡るまで弾性ひずみを蓄積するため、接触面積全域をすべり尽くす巨大イベントが発生することが原因であると考えられる。接触面積全域をすべると、ひずみは至るところでば0となり過去のすべり履歴は消去される。このような運動を繰り返せば、規則的かつ巨大なすべりイベントを引き起こすことができる。

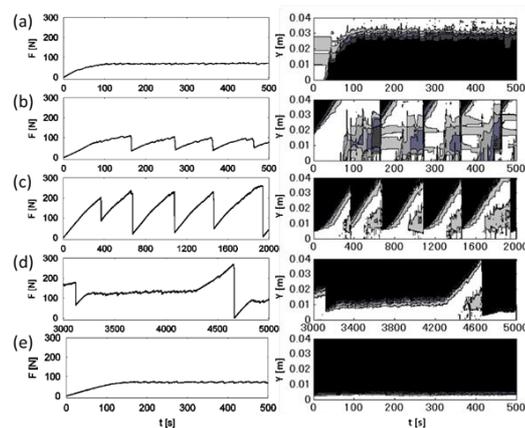


Fig.2: さまざまな初期傾き角における摩擦力の時間変化(左)および接触状態の時空間プロット(右,すべりに直交する方向に関して平均化したもの)。 $\vartheta_0 =$ (a)0, (b)0.23, (c) 0.94, (d) 1.06, (e)1.17°。 $F_N = 10 \text{ N}$ 。

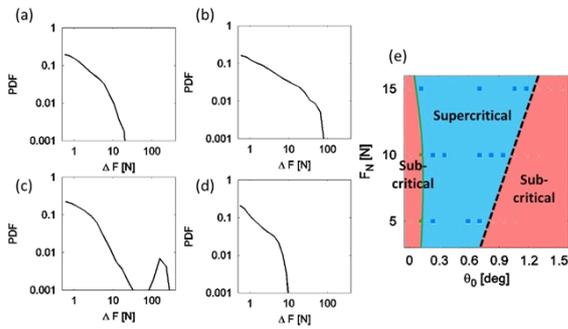


Fig.3: (a)-(d), さまざまな初期傾き角における頻度分布. $\theta_0 =$ (a)0, (b)0.12, (c) 0.94, (d) 1.06°, $F_N = 10\text{N}$. (e) θ_0 - F_N 相図.

また, 各すべりイベントの際の摩擦力降下量 ΔF を定義し, ΔF に関する頻度分布を得た. その結果を Fig.3 に示す. 初期傾き角の違いは, 頻度分布にも明確な違いをもたらすことが明らかになった.

一方, 巨大イベント発生直前の状態を把握するため, ブロック面積に対する剥離領域の面積比の Φ_{detach} を巨大イベント直前の摩擦力に対してプロットしたところ, Fig.4(a)のように明確な負の相関を見出すことが分かった. また, 摩擦力を“実効的な垂直荷重”で規格化することで, (b)のように荷重によらないマスターカーブを得ることに成功した. さらに, この規格化を初期傾き角と巨大イベント直前の摩擦力(c)やそのときのイベントサイズ(d)との関係にも適用したところ, 同様にマスターカーブを得ることができた((d), (f)参照).

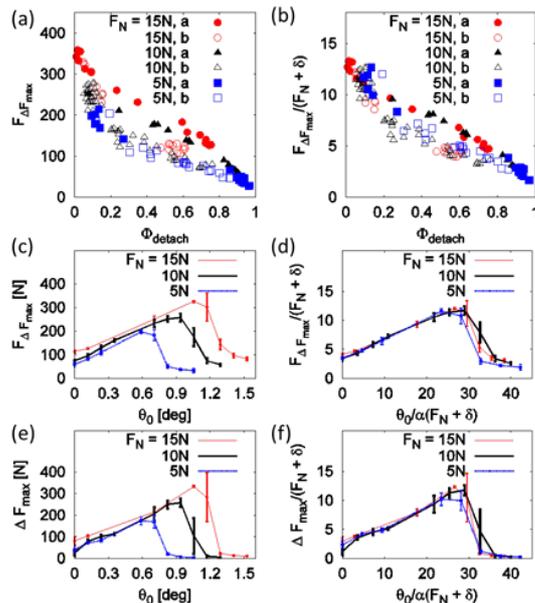


Fig.4: (a) 剥離領域の面積分率と巨大イベント直前の摩擦力との関係, (b) 縦軸に実効的な摩擦係数を取ることで得られたマスターカーブ. (c) 初期傾き角と最大イベント直前の摩擦力および(d)そのマスターカーブ. (e) 初期傾き角と摩擦力降下量との関係および(f)そのマスターカーブ.

なお当初計画では, 界面活性剤などの第3物質を摩擦界面に添加することで, スティック スリップ挙動の自己組織的な不均一化(界面のある領域でスティック スリップを引き起こしやすくなり, 別のところで起こりにくくなるなどの変化)を観察する実験を予定していたが, 再現性の問題や, できるだけ単純な設定のもとで実験結果の考察を行なう方がより効果的であるとの考えから, 初期傾き角や荷重の変化に対する系の応答を観察する研究に集中することになった. また, これらのパラメータは, プレート境界における応力状態にも関連しており, プレート境界で発生する巨大地震のメカニズムを探る上でも本質的であると考えられる.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

[1] Yutaka Sumino, Hiroki Shibayama, Tetsuo Yamaguchi, Tadashi Kajiya, Masao Doi, Failure of film formation of viscoelastic fluid: Dynamics of viscoelastic fluid in a partially filled horizontally rotating cylinder, Phys. Rev. E, 査読有, 85, 046307 (2012).

[2] Tetsuo Yamaguchi, Hiroyuki Muroo, Yutaka Sumino, Masao Doi, Asymmetry-symmetry transition of double-sided adhesive tapes, Phys. Rev. E, 査読有, 85, 061802 (2012).

[3] Atsuko Namiki, Tetsuo Yamaguchi, Ikuro Sumita, Takehito Suzuki, Satoshi Ide, Earthquake model experiments in a viscoelastic fluid: A scaling of decreasing magnitudes of earthquakes with depth, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 査読有, 119, 3169 (2014).

〔学会発表〕(計5件)

[1] 山口哲生, 高分子ゲルの摩擦実験におけるゆっくりすべりと巨大地震, 地球惑星科学連合大会, 2013年

[2] 山口哲生, ゲルのすべり摩擦における亜臨界-超臨界転移, 日本物理学会年次大会, 2014年.

[3] Tetsuo Yamaguchi, Sliding friction of sticky gels, Gordon Research Conference on Tribology (2014).

[4] 山口哲生, ゲルのすべり摩擦における巨大すべりの前駆過程, トライボロジー会議, 2014年.

[5] 山口哲生, 多数突起をもつゲル同士のすべり摩擦と集団運動, 日本物理学会年次大会, 2015年.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~design/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 哲生 (Yamaguchi, Tetsuo)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20466783

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：