

やわらかい弾性体の摩擦における接着・剥離の動力学と応力 ゆらぎ

Adhesion-detachment dynamics and stress fluctuations in friction of soft elastic bodies

By

山口 哲生*

Abstract

ゲルのようなやわらかい弾性体をすべらせると、しばしば、接着（固着）と剥離（はがれ）を繰り返す、スティックスリップ運動を示す。本研究では、シート状のゲルをガラス板上で一定速度で引っ張ったときに、引張速度の変化によって生じる、スティックスリップ運動の規則－不規則分岐について報告する。本研究ではさらに、低引張速度において見出された、すべりの規模に関する頻度分布のべき的振る舞い（地震学における Gutenberg-Richter 則）についても紹介を行う。

§ 1. はじめに

高分子ゲル（以降ゲルと呼ぶ）は、高分子が3次元的に極めてゆるく架橋されたネットワーク構造を持ち、力を加えると大きく変形する [1]。すなわち、ゲルはやわらかい弾性体である。ゲルを硬い基板上ですべらせようとする、金属やセラミックスのような硬い材料とは全く異なる、特異な摩擦挙動を示す。Schallamach は、やわらかくて粘着性のあるゴム（ゲルと同様、ネットワーク状の高分子からなる物質）に球を押し付けてすべらせようとする、Figure1 のようにゴムと球との接触部分にしわができ、そのパルスが接触部分前方から後方へと高速で移動することを見出した [2, 3]。このしわのことを Schallamach 波と呼ぶ。Schallamach 波によって接触域の剥離と再接着が起こり、界面ではすべりが無いにもかかわらず、ゴムと球は互いにその重心を移動させることができる（つまり、あたかもすべっているかのように見える） [2]。これは、アスペリティと呼ばれるミクロな多数の接触点相互に無相関に接着・剥離を繰り返しながらすべり運動を行なう、通常のすべり摩擦 [4] とは大きく異なり、真実接触点のみかけの接触面積程度まで広

Received March 28, 2016.

2010 Mathematics Subject Classification(s):

Key Words: *friction, gel, stick-slip, adhesion, detachment*

*九州大学大学院工学研究院機械工学部門, 819-0395

e-mail: yamaguchi@mech.kyushu-u.ac.jp

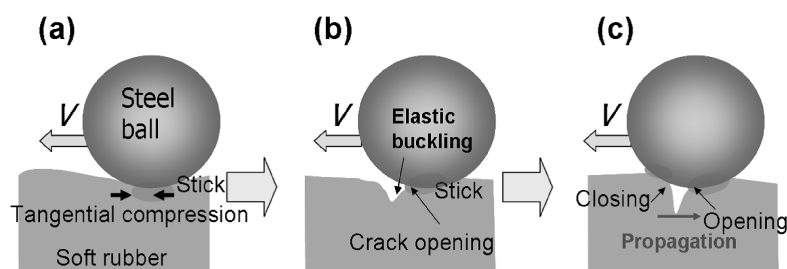


Figure 1. Schallamach 波. (a) やわらかいゴムに球を押し付け、左側に動かしたところ、(b) ゴムに座屈が発生、(c) さらに変形させると再接着が起こり、しわが右方向に伝播する。

がっついて協同的な接着・剥離が起こる、巨視的なすべり摩擦現象であると考えることができる。しかしながら、Schallamach 波の発生の際には弾性座屈などの複雑な変形を伴うため、メカニズムの詳細な理解には至っていない。

そこで我々は、これまで報告されている系に比べて単純な形状を持つ、シート状のゲルを用いて Schallamach 波の実験を行った [5, 6]。その結果、引張速度によって接着・剥離の時空パターンが規則－不規則分岐を起こすこと、高引張速度での定常的な振舞いが単純な 1 次元モデルで説明できること、低引張速度でのすべりの規模に関する頻度分布がべき乗則（地震学でよく知られている Gutenberg-Richter 則）[7, 8] を示すことなどが分かった。本稿では、それらの詳細について説明を行なう。

§ 2. 実験

§ 2.1. 試料

ポリエチレン系ゲルシート（商品名：スーパーゲル、東急ハンズで購入、厚み $H = 5$ mm）を、はさみで幅 $W = 70$ mm、長さ $L = 150$ mm にカットした。その後、両面に貼られている PET フィルム（厚み $50\ \mu\text{m}$ ）のうち片面を剥がして摩擦面とした。フィルムが両面に貼られている状態では試料はほぼ平坦であったが、片面を剥がすと摩擦面を内側にして曲率半径 $R = 75$ mm で湾曲した。ゲル表面には粘着性があるため、前述の Schallamach 波と同様、接着と剥離を繰り返すことで実効的なすべりを引き起こした。また、ゲルシートの上に貼られているフィルムのため、ゲルは伸びることはできず、摩擦実験の際にはせん断変形と曲げ変形のみが生じた。

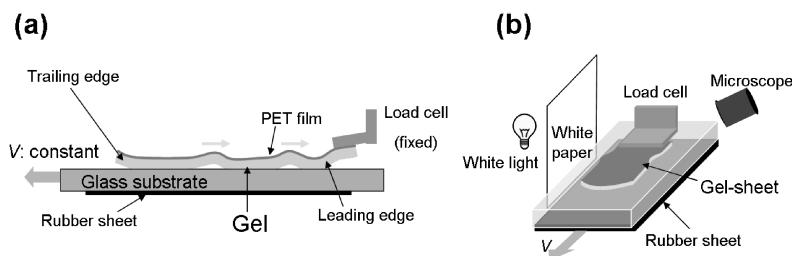


Figure 2. 実験装置の概略図.

§ 2.2. 摩擦実験

引張試験機 (MST - I, 島津製作所) に, 歯車を介してガラス基板を水平に移動させる機構を装着した. Figure2(a) のように, 固定されたロードセル (力センサー) に両面テープでゲルシートの片端を貼り付け, ガラス基板の移動速度 (引張速度 V) を段階的に $1000 \mu\text{m/s}$ から $1 \mu\text{m/s}$ まで遅くしたときにゲルに水平方向にかかる張力を測定し, これをゲル-基板間の摩擦力とした.

§ 2.3. 接触・非接触領域の可視化

Figure2(b) のような手法を用いてガラス基板とゲルシートとの接触域の可視化を行った. ガラス基板の底面には黒いゴムシートを貼り付け, 照明と CCD カメラ (VHX-200, キーエンス) をガラス基板に対してほぼ水平の角度で設置した. このことによって, ゲルがガラス基板に接触している部分は (光が透過するため) 色の濃い領域として, 接触していない部分は (透過しないため) 色の薄い領域として区別することができた.

§ 3. 結果と考察

§ 3.1. 典型的なすべり挙動

Figure3 に, 3つの異なる引張速度 ($V = 1000 \mu\text{m/s}$, $50 \mu\text{m/s}$, $2 \mu\text{m/s}$) におけるすべり挙動のスナップショットを示した. 引張速度が大きいとき ($V = 1000 \mu\text{m/s}$) には, 試料後端 (左側) での剥離と再接着をきっかけに直線状の非接触領域が周期的に試料後端から前端に伝播していくストライプ状のパターンが観察された. 一方, 引張速度が小さいとき ($V = 2 \mu\text{m/s}$) には, バブル (泡) 状の非接触領域が間欠的に試料後端から流入し, 前端へ向かって動くだけでなく, 停止したり, 横に移動したり, 後退したり, さらに, 分裂したり他の非接触領域と合一したりするなど, 不規則に動き回る様子が観察された. また, それらの中間の引張速度 ($V = 50 \mu\text{m/s}$) では, 試料後端では直線状の非接触領域が生成されるが, 試料の真中のあたりで崩壊する過程が見られた. このように, 引張速度によって非接触領域の運動様式が大きく変化することが分かった.

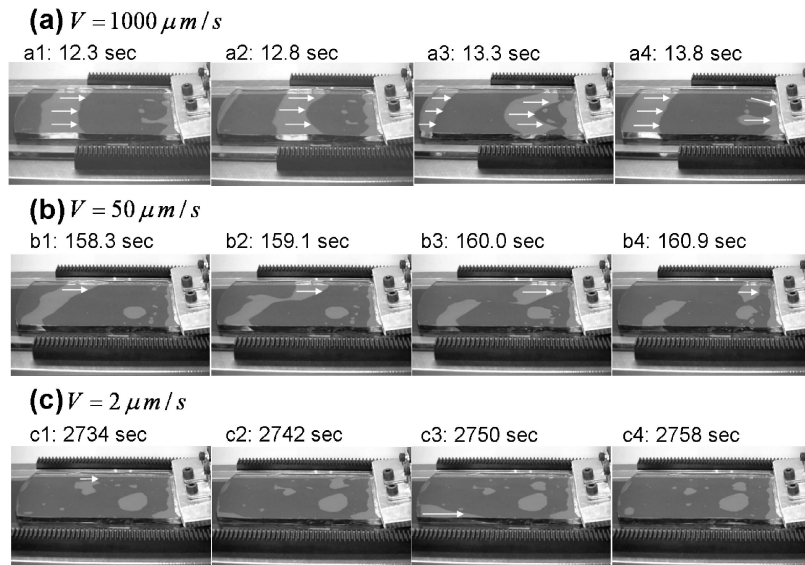


Figure 3. (a) $V = 1000 \mu\text{m/s}$, (b) $V = 50 \mu\text{m/s}$, および (c) $V = 2 \mu\text{m/s}$ におけるすべり挙動のスナップショット. 図中の矢印は非接触領域の運動方向を示し, 時間は実験を始めてからの経過時間を表示している. また, 色が濃い部分, 薄い部分はそれぞれ, ゲルとガラス基板との接触領域, 非接触領域を表している.

§ 3.2. 摩擦力の引張速度依存性

次に, 上記の3つの引張速度における摩擦力の時間変化を Figure4(a)-(c) に示した. 図中の a1~c4 までの記号は, それぞれ Figure3 のスナップショットに対応している. 引張速度が大きくストライプ状のパターンを示すとき (Figure4(a)) には摩擦力は周期的に変動し, 非接触領域が試料のほぼ中央にあるとき (Figure3 a2) に摩擦力は極大, 非接触領域が試料前端から抜けるととき (Figure3 a4) に極小を示した. 一方, 引張速度が小さくバブル状のパターンを示すとき (Figure4(c)) には, 非接触領域が動き始めると共に摩擦力が急激に降下する様子が観察された. また, 中間の引張速度のとき (Figure4(b)) には, 両者が混在したような挙動を示した. 特に, 引張速度が小さいときには摩擦力が複雑に変動しており, 非接触領域の移動によって剥離した面積と摩擦力降下量とに相関があると思われる. その一例として Figure3(c) の場合を見てみると, 試料ほぼ中央にあったバブルが c1 の時点で移動を始め, c2 の位置で停止した後, c3 において試料後端で別のバブルが生成して前端に向かって移動し, その結果 Figure4(c) に見られるような大きな摩擦力降下が発生した. このような摩擦界面でのすべり素過程の可視化に関する研究は, これまで (硬い) アクリルブロック同士などの系で行なわれているが [9], 非常に高速な現象 (伝播速度 $\sim \text{km/s}$) であるため, 撮影には超高速カメラを必要とするなど実験上の困難があり, 詳細な解析は進んでいない. 一方, 本研究では, やわらかく粘着性のあるゲルを用いることによって, 通常のビデオカメラでも容易に撮影することができる, ゆっく

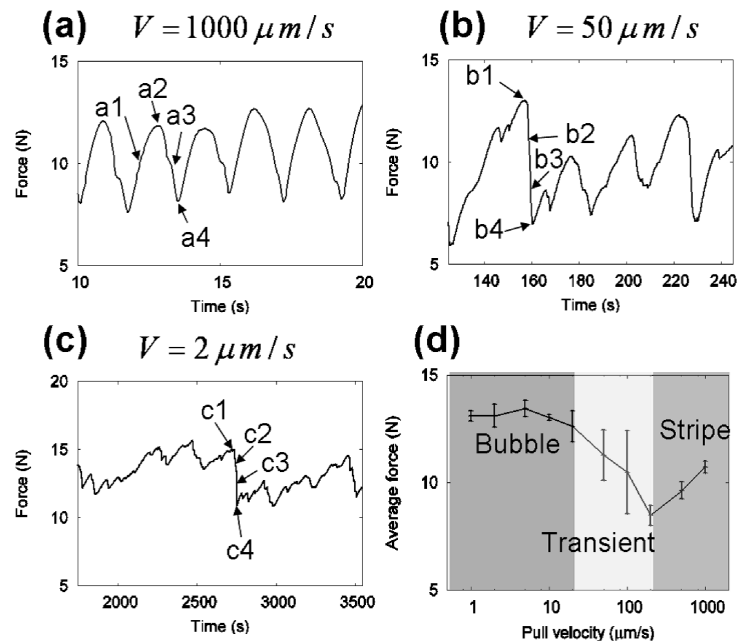


Figure 4. (a) $V = 1000 \mu\text{m/s}$, (b) $V = 50 \mu\text{m/s}$, および (c) $V = 2 \mu\text{m/s}$ における摩擦力の時間変化. a1～c4 までの点は Figure 3 のスナップショットにそれぞれ対応している. (d) 時間平均した摩擦力の引張速度依存性.

りとしたすべり運動を起こすことができる. ここでは触れないが, 実際に筆者らは画像解析によってひずみの空間分布を取得し, 非接触領域の挙動と摩擦力との関係を議論している. 詳しくは, 文献 [6] を参照頂きたい. また, 各引張速度における摩擦力の時間平均を Figure 4(d) に示した. 引張速度が大きいストライプ領域では, 引張速度とともに摩擦力は増加, 引張速度が小さいバブル領域では摩擦力はほぼ一定となる傾向を示した. また, その中間の速度領域では, 摩擦力は引張速度を減少させた後増加させるとヒステリシスを示すなど, 履歴に強く依存した.

§ 3.3. 規則的な挙動のモデル化

前節では, 引張速度によるすべり挙動の違いについて述べた. ここでは, 高引張速度における規則的な挙動 (ストライプ状パターン) を理解するため, モデル化を試みた. Figure 5 にモデルの概略図を示した. 十分に長いゲルの右端を固定したまま, ガラス基板を一定速度 V で移動させたとき, 非接触領域が速度 $v (> V)$ で周期的に伝播しているとす. また, 接触領域, 非接触領域の長さをそれぞれ L_c, L_n とする. いま, ゲルに加えられたせん断ひずみに着目すると, 非接触領域の左端 (接触域の右端) は接触した直後であり, せん断ひずみは 0 である. その点から左 (後端側) にいくにつれ, 接触時間に比例してひずみが増えていき, 接触領域の左端でせん断ひずみは最大値 $\gamma_{crit} = V t_{contact} / H = V L_c / v H$

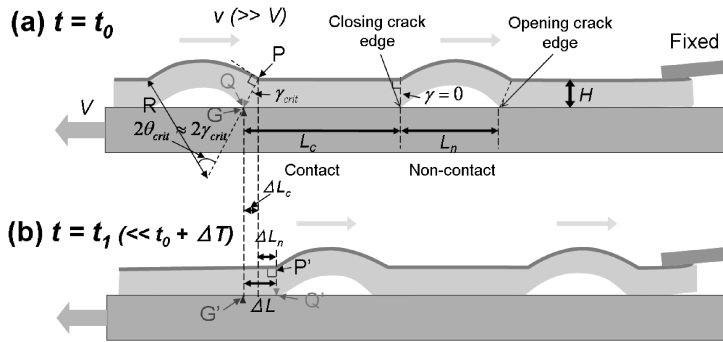


Figure 5. ストライプ領域におけるモデル化の概略図. 図中の点 (P, P'), (Q, Q'), (G, G') はそれぞれ, PET フィルム, ゲル下面, 基板上面に付けられた同じ点を表す. 時刻 $t = t_0$ でちょうど非接触領域が点 G に到達し, 時刻 $t = t_1$ で通過したとすると, ゲル下面はその間に G', Q', GQ' だけ相対変位する (波の伝播速度は引張速度に比べて 50 倍程度大きいため, 長さ GG' は無視できる). ゲルの粘着性のため, その他の時間では相対変位は発生しない.

(t_{contact} は接触領域左端での接触時間, H はゲルの厚み) をとる. このとき, 一つの非接触領域が通過することによって生じる相対変位 ΔL は, 次のように表現される.

$$(3.1) \quad \Delta L = \Delta L_c + \Delta L_n$$

ここで $\Delta L_c \approx H\gamma_{\text{crit}}$ はせん断ひずみが解放されることによる相対変位, $\Delta L_n \approx 2R(\theta_{\text{crit}} - \sin\theta_{\text{crit}}) \approx R\theta_{\text{crit}}^3/3 \approx \gamma_{\text{crit}}^3/3$ (R はゲルの曲率半径, θ_{crit} は弧の部分の角度の半分で, γ_{crit} で近似できる) は非接触領域の弧の長さと距離の差であり, 非接触領域が尺取虫のように湾曲することによって得られる変位である. また, ΔL は波の速度と周期に関する関係式から導くこともできる.

$$(3.2) \quad \Delta L = VT = V \frac{L_c + L_n}{v} \approx \frac{V(Hv/V + 2R)\gamma_{\text{crit}}}{v},$$

ここで T は波の周期である. (3.1) 式, および (3.2) 式を用いると, 最大せん断ひずみの関係式として

$$(3.3) \quad \gamma_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{6V}{v}}$$

を得ることができる. 次に, 亀裂進展の運動則を導入する. 破壊力学によれば, 亀裂進展の駆動力は, ひずみエネルギー解放率 G (単位面積の亀裂が生成されることによって

解放される弾性エネルギー) によって与えられる [10]. ここでは, G は次の式で近似される [11].

$$(3.4) \quad G = \frac{\mu H \gamma_{crit}^2}{2} = \frac{3\mu H V}{v}$$

ここで μ はゲルのせん断弾性率であり, (3.3) 式の結果を用いた. また, 粘弾性体における亀裂進展条件として, 進展速度に依存する抵抗 $G_c(v) \approx G_0(v/v_0)^\alpha$ (G_0 は接着仕事と呼ばれる量で単位面積の表面を準静的に引離すのに必要なエネルギー, v_0 は基準速度, α は速度依存性の強さを表す指数であり, すべて剥離試験などにより決定可能な量である) を用いる [10]. 結局, 駆動力 G ((3.4) 式) と抵抗 G_c をバランスさせることで次の結果を得る.

$$(3.5) \quad v = v_0 \left(\frac{3\mu H}{G_0} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}} \left(\frac{V}{v_0} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}},$$

$$(3.6) \quad \gamma_{crit} = \sqrt{6} \left(\frac{3\mu H}{G_0} \right)^{-\frac{1}{2(1+\alpha)}} \left(\frac{V}{v_0} \right)^{\frac{\alpha}{2(1+\alpha)}},$$

$$(3.7) \quad L_c = \sqrt{6} H \left(\frac{3\mu H}{G_0} \right)^{\frac{1}{2(1+\alpha)}} \left(\frac{V}{v_0} \right)^{-\frac{\alpha}{2(1+\alpha)}},$$

$$(3.8) \quad L_n = 2\sqrt{6} R \left(\frac{3\mu H}{G_0} \right)^{-\frac{1}{2(1+\alpha)}} \left(\frac{V}{v_0} \right)^{\frac{\alpha}{2(1+\alpha)}},$$

$$(3.9) \quad F_{ave} \approx \frac{\sqrt{6}\mu LW}{2} \left(\frac{G_0}{3\mu H} \right)^{\frac{1}{2(1+\alpha)}} \left(\frac{V}{v_0} \right)^{\frac{\alpha}{2(1+\alpha)}}$$

ここで L, W はそれぞれ試料の長さ及び幅を表す. また, 摩擦力の時間平均 F_{ave} ((3.9) 式) は, 簡単な計算により, 外力による仕事率と系内部のエネルギー散逸の釣り合いに関する次式を満たしていることが分かる [3].

$$(3.10) \quad F_{ave} V = n W G_c(v) v,$$

ここで $n = L/(L_c + L_n) \approx L/L_c$ は接触面内の非接触領域の数である. 理論モデルの検証のため, ストライプ状領域における実験結果を Figure 6 に示した. Schallamach 波の伝播速度, 接触領域の長さ L_c , 非接触領域の長さ L_n , 摩擦力の時間平均 F_{ave} の引張速度依存性の指数は, 実験ではフィッティングによってそれぞれ 0.75, -0.13, 0.13, 0.15 と求

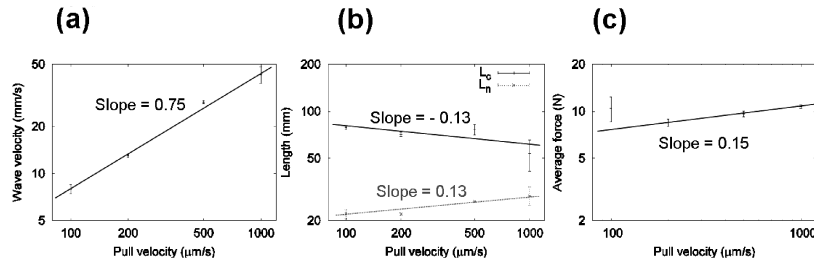


Figure 6. ストライプ領域における引張速度依存性. (a) Schallamach 波の伝播速度, (b) 接触領域および非接触領域の長さ, (c) 時間平均した摩擦力の引張速度依存性. (a), (b) については, 画像解析から求めた.

められた. 一方, 理論では $\alpha = 1/3$ とおくことにより, それぞれ 0.75, -0.125, 0.125, 0.125 と計算され, ひとつのフィッティングパラメータ α の存在を仮定することにより, 実験の全ての指数についてコンシステントな結果を得ることができた. これまで Schallamach 波の研究は数多く行なわれてきたが, 今回のようなパターンの形状や波の伝播速度に関する解析式は, 我々が知る限り与えられていなかった. 今回このように単純な数式で Schallamach 波の挙動を表現できたのは, ゲルシートでは波の生成メカニズムが Figure 1 のような座屈を伴う大変形ではなくせん断変形であったことや, 薄板条件 (厚み方向の自由度が無視できる) を満たしていたことなど, 実験系の単純化を図ることができたためだと考えられる.

§ 3.4. 摩擦降下量の頻度分布

Figure 4(c) に示された低引張速度における摩擦力の時間変動を見ると, 小刻みな摩擦力変動は頻繁に発生するものの, 大きな摩擦力変動はたまにしか起きないように見える. 摩擦力変動の統計性を調べるため, Figure 7 に摩擦力降下量 (摩擦力の極大値と次の極小値との差で, 1 回のイベントで摩擦力が落ちた大きさ) とその累積頻度との関係を示した. Figure 7(a) を見るとわかるように, 摩擦力降下量とその頻度分布はべき乗則を示した. これは, 地震学でよく知られている Gutenberg-Richter 則 [7, 8] (地震の規模と発生頻度との関係で, マグニチュードが 1 大きくなると発生頻度はおよそ 1/10 になるという経験則) と同様な現象である. また, 引張速度と指数の絶対値との関係を Figure 7(b) に示した. 引張速度の減少とともに指数の絶対値が大きくなっていることが分かる. これまで, バネブロックモデル [8, 12], セルラーオートマトンモデル [14, 15], 粉体実験 [16, 17] などではべき乗則が確認されているが, ゲルのような連続体を用いた実験系では意外にも (我々が知る限り) 報告例がない. では, なぜゲルシートの系ではべき乗則を示したのだろうか? 今のところよくわかっていないが, ゲルのもつやわらかさと粘着性が重要ではないかと思われる.

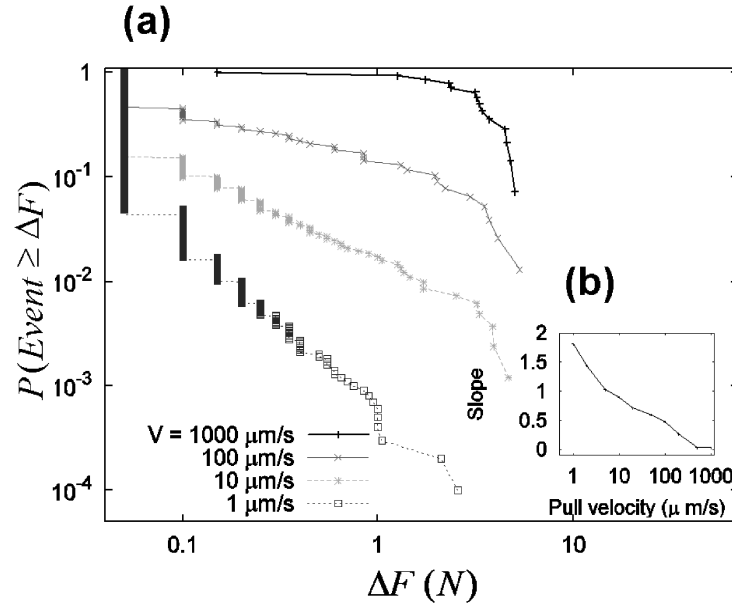


Figure 7. (a) 摩擦力降下量の累積頻度分布. 異なる線は引張速度の違いを表す. (b) 指数の引張速度依存性.

§ 4. まとめと今後の課題

本稿では、粘着性ゲルシートを用いてすべり摩擦実験を行ったところ、すべり速度の減少に伴って接触・非接触領域のパターンがストライプ状からバブル状に変化することが分かった。また、すべりの規模に関する頻度分布を取ってみたところべき乗則を示すことが分かった。今後の課題としてはまず、なぜ複雑な時空間パターンやべき乗則を生じるかという疑問に答えることである。固体のすべり摩擦における定常すべり・スティックスリップ転移 [4] やバネ・ブロックモデルにおける sub-critical/super-critical 転移 [13] との関連も含め、現在検討を行なっている。また、本稿では述べなかったが、本研究で観察されたすべりは音（地震波）を伴わずゆっくりと起こっている。これは最近地震学の分野で注目を集めているゆっくり地震 [18]) に相当すると考えられる。これまで地震学における室内実験では、アクリル樹脂 [9] や実際の岩石 [19]-[21] などの硬い材料を用いた、摩擦構成則の測定やすべり素過程を調べるものがほとんどであった。ゲルを用いた今回の研究を発展させることにより、地震間の力学的相互作用や、断層内部での物質の状態変化・反応・拡散などを考慮した、より広域でかつリアルな断層モデル実験が今後可能になっていくと期待される。

References

- [1] Strobl G.R., The Physics of Polymers, *Springer Verlag* (Berlin) (1996).
- [2] Schallamach A., How does rubber slide?, *Wear*, **17** (1971) 301–312.
- [3] Roberts A.D., Jackson S.A., Sliding friction of rubber, *Nature* **257** (1975), 118–120.
- [4] Persson B.N.J., Sliding Friction Physical Principles and Applications- 2nd edition, *Springer* (2000).
- [5] Yamaguchi T., Ohmata S., Doi M., Regular to chaotic transition of stickslip motion in sliding friction of an adhesive gel-sheet, *J. Phys.: Cond. Matt.*, **21** (2009) 205105.
- [6] Morishita M., Kobayashi M., Yamaguchi T., Doi M., Observation of spatio-temporal structure in stickslip motion of an adhesive gel sheet, *J. Phys.: Cond. Matt.*, **22** (2010), 365104.
- [7] Gutenberg B., Richter C.F., Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, 2nd Ed., *Princeton Univ. Press* (1954).
- [8] Carlson J.M., Langer J.S., Properties of Earthquakes Genetrated by Fault Dynamics, *Phys. Rev. Lett.*, **62** (1989) 2632–2635.
- [9] Rubinstein S.M., Cohen G., Fineberg J., Detachment fronts and the onset of dynamic friction, *Nature*, **430** (2004), 1005–1009.
- [10] Persson B.N.J., Albohr O., Heinrich G., Ueba H., Crack propagation in rubber-like materials, *J. Phys.: Cond. Matt.*, **17** (2005), R1071-R1142.
- [11] Kendall K., Interfacial dislocations in tough adhesive composites, *Phil. Mag.*, **A 43** (1981), 713–729.
- [12] Carlson J.M., Langer J.S., Shaw B.E., Dynamics of earthquake faults, *Rev. Mod. Phys.*, **66** (1994), 657.
- [13] Mori T., Kawamura H., Simulation study of earthquakes based on the two-dimensional Burridge-Knopoff model with long-range interactions, *Phys. Rev. E*, **77** (2008), 051123.
- [14] Olami Z., Christensen K., Temporal correlations, universality, and multifractality in a spring-block model of earthquakes, *Phys. Rev. A*, **46** (1992), 1720.
- [15] Olami Z., Feder H.J.S., Christensen K., Self-Organised Criticality in a Continuous, Non-conservative Cellular Automaton Modeling Earthquakes, *Phys. Rev. Lett.*, **68** (1992), 1244.
- [16] Dalton F., Corcoran D., Self-organized criticality in a sheared granular stick-slip system, *Rhys. Rev. E*, **63** (2001), 061312.
- [17] Bretz M., Zaretski R., Field S.B., Mitarai N., Nori F., Broad distribution of stick-slip events in Slowly Sheared Granular Media: Table-top production of a Gutenberg-Richter-like distribution, *Europhys. Lett.*, **74** (2006), 1116–1122.
- [18] Ide S., Beroza G.C., Shelly D.R., Uchide T., A scaling law for slow earthquakes, *Nature*, **447** (2007), 76–79.
- [19] Scholz C.H., The Mechanics of Earthquakes and Faulting, 2nd ed., *Cambridge University Press* (Cambridge) (2002).
- [20] Dieterich J.H., Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip, *Pure Appl. Geophys.*, **116** (1978), 790–806.
- [21] Marone C., The effect of loading rate on static friction and the rate of fault healing during the earthquake cycle, *Nature*, **391** (1998), 69–72.