

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820035

研究課題名(和文)摺動物体のバルク変形の積極的利用による摩擦の制御

研究課題名(英文)Friction control based on bulk deformation of sliding material

研究代表者

前川 覚 (Maegawa, Satoru)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：90637406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：透明なシリコンゴム(PDMS)とガラスまたは樹脂試験片の間の接触面を透過光学系により観察することで、軟質材料のすべり摩擦における接触面ダイナミクスの可視化を行った。その結果、軟質材料のすべり摩擦では、他の剛体材料には見られない特異なスティックスリップモードが存在することを明らかにした。また、接触面内の接線方向変位分布を画像相関法により可視化することで、静摩擦中に生じる微小すべり、または微小変位の定量化を行った。

研究成果の概要(英文)：In-situ observations for a contact interface of sliding elastomers were performed by using a friction tester with a transmission optical system that can visualize the contact interface between a cross-linked poly-dimethyl siloxane (PDMS) specimen and rigid transparent plane. As a result, it was found that the mechanism of stick-slip in sliding friction of soft adhesive elastomers is quite different from that of other solid materials. Furthermore, the surface displacement filed within the apparent contact region was visualized using digital image correlation method. It provided a direct estimation of the tangential contact stiffness that resulted from the tangential deformation at the contacting asperities.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー ゴム スティックスリップ 接触面観察 真実接触部 透過光学系

1. 研究開始当初の背景

ゴムやゲルなどを摺動部材として使用する場合、軟質材料に特有の界面不安定現象に注意する必要がある。例えば、界面のシャルマック波の伝播やバルクの大変形などに起因するスティックスリップは、摺動部の円滑な相対運動を阻害して、システムの性能を著しく低下させる要因となる。

これらの界面現象の発生原因を正確に把握するためには、摺動面のその場観察が必要不可欠である。しかしながら、接触する2面の間で生じる変形挙動を直接に観察することは容易ではなく、それらの変形メカニズムについては未だ不明な点が多い。

2. 研究の目的

そこで本研究では、透明な樹脂材料をモデル試験片として利用して、接触面内の変形挙動の可視化システムの構築を目指す。具体的には、透明なシリコンゴム (PDMS) とガラスまたは樹脂試験片の間の接触面を透過光学系により観察する。また、得られた情報をもとに、界面変形のメカニズムおよびそれらがマクロな摩擦挙動に及ぼす影響について調査する。

3. 研究の方法

本研究で作成した2種類の実験装置の概略図を図1と2に示す。

(1) 図1の装置は、界面の真実接触部の時間変化とバルクの変形挙動を可視化することが可能である。円筒ディスクをPDMS板に押し付けて(接触荷重 W : 最大 25 N)、図中の接線方向にPDMS板を一定速度で駆動した(駆動速度 V : 最大 100 mm/s)。円筒ディスクの下方に設置した動力計により、接線力 F_x と垂直力 F_z を計測した。同時に、高速度光弾性観察が可能なカメラと円偏光フィルタ内蔵のLED照明を用いて、PDMS板のバルクの応力分布の時間変化を計測した。PDMS板の復屈折性により生じる円偏光の位相差 $\theta(x, t)$ の時間差分 $\Delta\theta(x, t)/\Delta t$ を導出することで、応力分布の時間変化を可視化した。さらに、透過光学系を別途設置することで、同時に真実接触部の可視化を行った。

(2) 図2の装置は、界面の真実接触部と非接触部の接線方向の変形挙動を同時に可視化することが可能である。まず、リンク機構を利用してゴム板をガラス半球に押し付ける。垂直荷重は、おもりの質量を変更することにより調整が可能であり、 $F_z = 0.03\text{ N}$ とした。次に、ゴム板をX方向自動ステージで駆動($V = 0.1\text{ mm/s}$)させることにより、接線荷重 F_x を与えた。接線荷重 F_x の時間変化

は、ゴム板を支持する板ばねの変位を渦電流変位計により計測することで取得した。接触面の画像は、接触面上に設置したCCDカメラにより撮影した。

真実接触部と非接触部の測定原理は以下のとおりである。接触面の上方に白色光源を設置して、接触面を透過した透過光の強度分布を対物レンズに固定したCCDカメラにより計測する。図中に示すように、接触部では両接触面の屈折率差が低いいため入射光は直線的に進むのに対して、非接触部では両接触面と空気の屈折率差により入射光は屈折・散乱する。したがって、透過光強度の空間分布を計測することで真実接触部の空間分布を可視化できる。

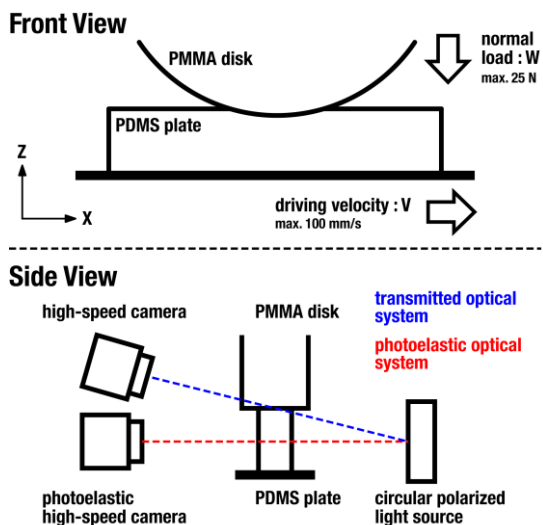


図1 実験装置1

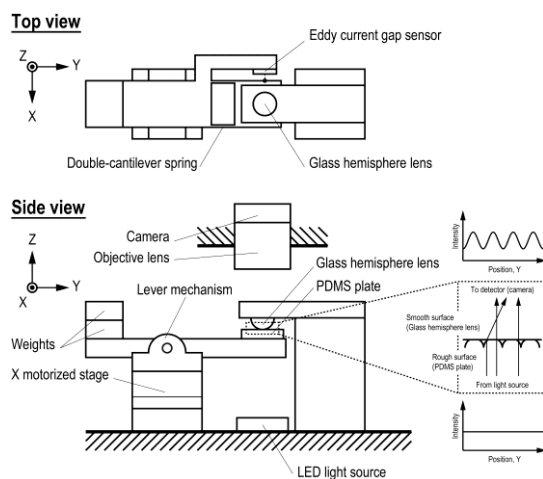


図2 実験装置2

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) 実験装置1(図1)により、高凝着性を有する軟質材料(PDMD)のすべり挙動は、図3に示す3種類に区分されることが明らかと

なった。同図上から、シャルマック波の伝播に起因するスティックスリップ (Mode 1), バルクの大変形に起因するスティックスリップ (Mode 2), 安定すべり (Mode 3) である。Mode 1 は表面特性 (例えば, 凝着力) に, Mode 2 はバルク特性 (例えば, ヤング率) に影響を受けると予想される。従って, 表面特性とバルク特性を切り分けて考えることが, 軟質材料をトライボシステムとして利用するためのひとつの課題であることが明らかとなった。

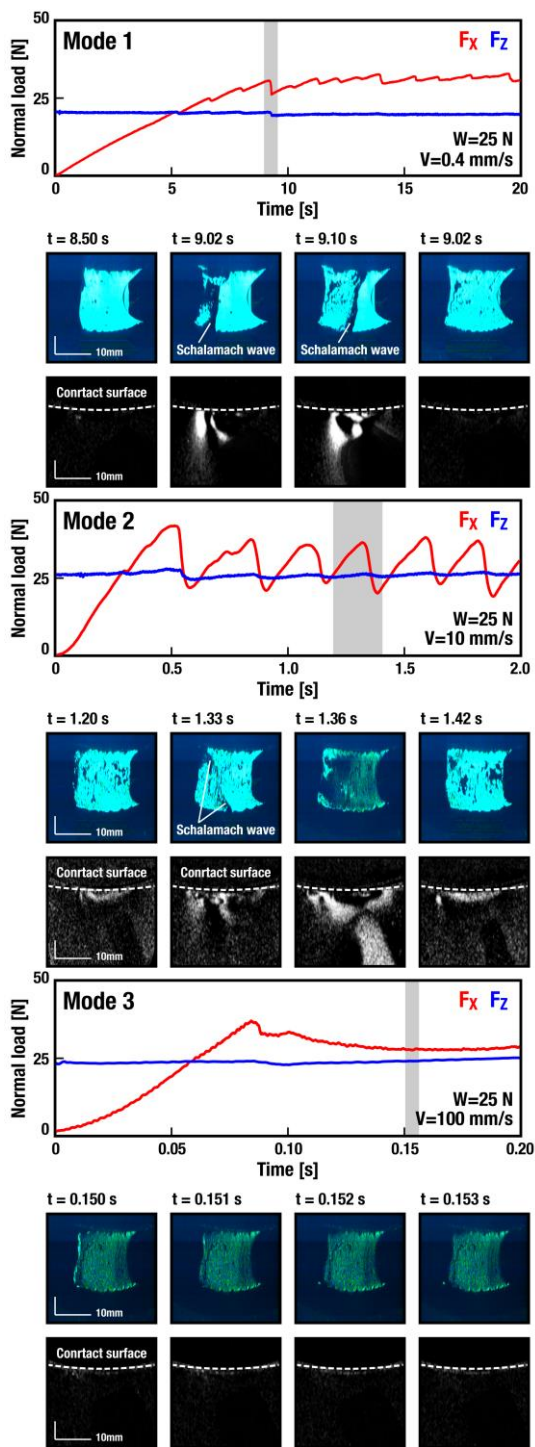


図3 実験装置1によって観察された3種類の軟質材料すべりモード

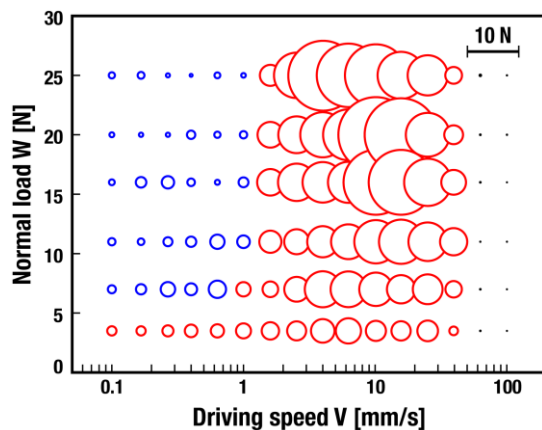


図4 摩擦振動の振幅マップ

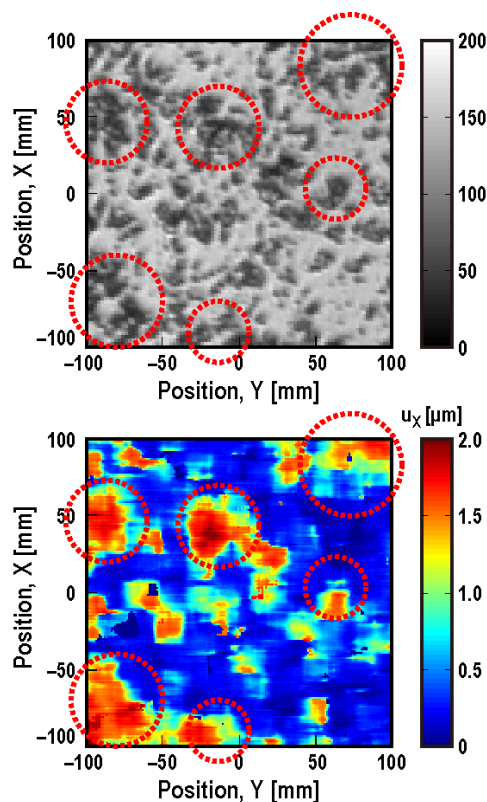


図5 真実接触部の空間分布 (上) と接線方向変位の空間分布 (下)

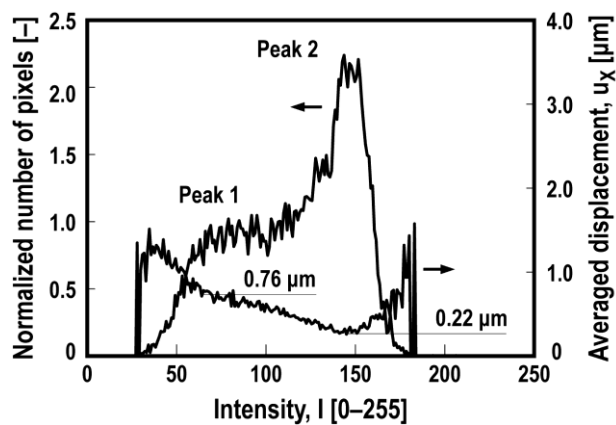


図6 接触部内の透過光強度分布のヒストグラムの接線方向変位のヒストグラム

(2) 実験装置 1 (図 1) により, 高凝着性を有する軟質材料 (PDMD) のすべり摩擦における摩擦振動振幅と作動条件 (接触荷重 W とすべり速度 V) の関係を明らかとした (図 4). 同図より, ある駆動速度で摩擦振動振幅は非常に大きな値を示すことがわかる. これは, 一般的な摩擦振動 (低速度かつ高荷重において大きな振動振幅を示す) とは異なる軟質材料特有の振動特性である. したがって, ゴムやゲルなどを摺動材料として使用する場合, 作動条件に注意する必要があることが明らかとなった.

(3) 実験装置 2 (図 2) により, 接触面の可視化と接線力を加えた場合における接触面内の変位分布の可視化が可能となった. 同図は, 接触面積を透過光学系の輝度分布解析, 接線方向の変形分布を画像相関法により算出した結果である. ただし, 同図の上方は, 接触部の中心近傍における接線荷重を付加する前の透過光強度, 同図の下方は同一の領域における接線方向の変位分布である. 同図より, 初期状態において非接触の領域 (赤色の破線部) では, 大きく変形している. 一方で, 初期状態において直接接触している箇所では, 変形量は小さい. したがって, 同図よりマクロな巨視すべりが生じない静摩擦条件であっても, 接触面内では微小な局所すべり, または弾性変形が生じていることがわかる. すなわち, マクロなすべり特性だけでなく, 微小なマイクロすべりを考慮したシステム設計が, 駆動機構の位置決め精度や剛性, システムの安定性に必要不可欠であることが示唆された.

(3) 実験装置 2 (図 2) により, 接触面の可視化による接線方向の接触剛性の定量化が可能となった. 図 6 は図 5 での透過光強度と変位分布のヒストグラムを同一グラフ上に図示したものである. 非接触部と接触部の変形量の差 Δu_x および与えた接線荷重 F_x を用いて, 粗さ部の接触剛性 K_T を次式で表すことが可能である.

$$K_T = \frac{F_x}{\Delta u_x} = \frac{F_x}{u_{x\text{Peak1}} - u_{x\text{Peak2}}} \quad (1)$$

ここで, $u_{x\text{Peak1}}$ および $u_{x\text{Peak2}}$ はそれぞれ, 図 6 における Peak 1 (I_{p1}) での変形量, Peak 2 (I_{p2}) での変形量である. それらの値を式 (1) に代入することにより, 本システムでの接触剛性 K_T を 0.53×10^6 N/m と算出した.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

① 前川 覚, 糸魚川 文広, 新吉 隆利, 鈴木 厚, 田所 千治 & 中野 健, 摺動体の弾性変形に着目した静摩擦係数の設計指針, 日

本機械学会論文集 C 編 79 (803) pp. 2622-2634, 2013. [査読有]

② 前川 覚, トライボ環境下における界面ダイナミクスの可視化を目指して, トライボロジスト 60 pp. 119-125, 2015. [査読無]

[学会発表] (計 3 件)

① 前川 覚, 糸魚川 文広, 中村 隆, 粗さを有する接触面の接線方向接触剛性に関する研究-透明な樹脂材料同士の接触面の直接観察による接触面内変形分布の可視化-, 精密工学会講演論文集 (東京 2015/03/17)

② Satoru Maegawa, Fumihito Itoigawa, Takashi Nakamura, A novel design concept of slide guideway focusing on elastic compliance of contact surface, 15th International Conference of Precision Engineering, (Kanazawa 2014/07/24) P70.

③ 前川 覚, 糸魚川 文広 & 中村 隆, 弾体のすべり摩擦におけるバルクの変形と接触面の局所すべり, トライボロジー会議予稿集 (福岡 2013/10/23) .

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前川 覚 (MAEGAWA SATORU)

名古屋工業大学・工学研究科・研究員

研究者番号: 90637406