

令和元年6月7日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14578

研究課題名(和文) ソフトマター摺動材の高柔軟性を積極的に利用した新しい摩擦力チューニング手法の開拓

研究課題名(英文) Development of novel tuning method of frictional force positively using high flexibility of soft matter sliding materials

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)・准教授

研究者番号：90637406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：粗さを有する低剛性材料(ゴムやゲルなど)のすべり摩擦を対象として、バルク変形と真実接触面積の可視化が可能な摩擦試験機を開発した。同試験機を利用することで、摺動材料のバルク変形と摩擦力の関係を実験的に計測することが可能となった。さらには、バルク変形特性と摩擦特性の関係を定量化するための素過程摩擦モデルを導出した。同モデルでは、摩擦係数(垂直応力とせん断応力の比)に及ぼす接触面圧の影響を数理的に表現可能である。同モデルによって得られる摩擦構成式を有限要素法などに組み込むことで、システムの摩擦力に及ぼすバルク変形の効果を数値シミュレーションにより予測することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の意義は、ソフトマター摺動材の高柔軟性を積極的に利用するという新たなアイデアに基づいて、『接触面変形能制御による摩擦力チューニング手法』を開拓した点である。本研究で提案した新手法は、微細表面テクスチャの付与や表面改質といった従来の摺動面設計法とは一線を画す新たなコンセプトに基づくものであり、軟質材料の摩擦制御に向けて新たな展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：We developed a friction tester that can visualize bulk deformations and real contact regions for sliding friction of low modulus materials (rubber, gel, etc.) with surface roughness. By using this apparatus, it has become possible to experimentally measure the relationship between the bulk deformation of the sliding material and the frictional force. Furthermore, an elementary process friction model was derived to quantify the relationship between bulk deformation characteristics and friction force. The model can mathematically express the effect of the contact pressure on the friction coefficient (the ratio of normal stress to shear stress). By incorporating the friction constitutive equation obtained by this model into the finite element method etc., it became possible to predict the effect of bulk deformation on the friction force of the system by numerical simulation.

研究分野：トライボロジー，機械工学，振動工学，設計工学

キーワード：トライボロジー 摩擦制御 ゴム ソフトマター 摩擦係数 摩擦力 真実接触面積

1. 研究開始当初の背景

従来より、摩擦の制御に向けての設計指針と言えば、微細表面テクスチャの付与や表面改質といった摺動部のインターフェイスに着目したものである。これらの手法に共通することは、摩擦の発現機構をインターフェイス近傍のミクロな空間領域に限定するという点であり、接触面に作用するせん断抵抗を低下（もしくは増加）させることで摩擦力を制御することを基本とする。

一方、小さな力でも容易に変形するソフトマターを対象とする場合、摺動物体形状が摩擦力を決定する重要な因子となる。このことは、ソフトマターを対象とする場合、上記のせん断抵抗に着目した摩擦制御手法とは別に、バルク形状に着目した摩擦制御手法が可能であることを意味する。近年では、実験的および解析的に摺動物体形状と摩擦力の関係を定式化する試みが多くなされており、バルク変形の利用による摩擦制御手法の応用例も報告されている。

2. 研究の目的

以上の背景のもと本研究では、下記の2つを研究目的とする。

(1) バルク変形をともなうゴム材料のすべり摩擦を対象として、真実接触面積と摩擦力の計測が可能なるすべり摩擦試験機を開発する。

(2) 摺動体バルク変形特性と摩擦挙動を定量的に結び付ける基礎モデルを提案して、バルク変形と摩擦力の関係を数値シミュレーションにより予測する計算アルゴリズムを提案する。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために下記の2つの研究を行った。

(1) 図1は本研究で開発した接触面積と摩擦力の同時計測が可能なるすべり摩擦試験機の模式図である。本試験機は、ゴム試験片とポリメチルメタクリレート (PMMA) 製の透明プリズムとの間の接触界面を使用する。試験機の側面図 (図1右図) に示すように、ゴムと PMMA プリズムとの間のすべり界面を直接観察するために全反射光学系が組み込まれている。接触界面への光源の入射角は、PMMAと空気との界面での全反射に必要な臨界角 (42°) よりも大きい値に設定されている。すなわち、真実接触部ではレーザー光はゴム試験片に吸収される一方で、非接触面では全反射する。接触面からの反射光を CCD カメラで観察すると、接触部と非接触部の間に反射光強度のコントラストが現れる。なお、実験手順は以下の通りである。鉛直方向の電動ステージを用いて垂直荷重を加えた後、水平方向の電動ステージを用いて接線荷重を加えた。摺動中の摩擦力変化は、ゴム試験片の下方に配置した動力計によりモニタリングする。従って、動力計の計測結果と CCD カメラの観察結果を同期させることで、真実接触部と摩擦力の同時計測が可能となる。

(2) 上記のすべり摩擦試験の結果を定量的に評価するために、以下の手順に従って摩擦構成式を導出した。図2に示すように表面に粗さを有するゴム材料 (形状は任意) と剛平面の接触を考える。見かけの接触面内のある微小な見かけの接触領域 $\Delta A_{\text{apparent}}$ (ただし、Persson の接触理論が成立するのに十分な面積を持つ) を考える。Persson の接触理論に基づけば、 $\Delta A_{\text{apparent}}$ に含まれる真実接触面積 ΔA_{real} は次式の式 (1) で表される。

$$\Delta A_{\text{real}} = \frac{\Delta A_{\text{apparent}}}{(\pi K)^{1/2}} \int_0^p d\sigma e^{-\sigma^2/4K} = \Delta A_{\text{apparent}} \operatorname{erf} \left(\frac{p}{2K^{1/2}} \right) \quad (1)$$

ここで、 p は微小領域に働く垂直応力、 K は真実接触面積の増加特性を支配する特徴量であり、 $K = E^2 \kappa^2 / 8(1-\nu^2)^2$ で記述される。ただし、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 κ は表面のパワースペクトルから導出される粗さの特徴量である。また、図3に、式(1)に基づいて計算した $\Delta A_{\text{real}} / \Delta A_{\text{apparent}}$ の接触応力 p 依存性を示す。ここで、微小領域に加わる摩擦力 ΔF は $\Delta F = \tau \Delta A_{\text{real}}$ 、微小領域に加わる垂直荷重 ΔW は $\Delta W = p \Delta A_{\text{apparent}}$ であるので微視領域におけるローカルな摩擦係数 μ_{local} は下記で表される。

$$\mu_{\text{local}} = \frac{\Delta F}{\Delta W} = \frac{\tau \Delta A_{\text{real}}}{p \Delta A_{\text{apparent}}} = \frac{\tau}{p} \operatorname{erf} \left(\frac{p}{2K^{1/2}} \right) \quad (2)$$

以上のように粗さを有するゴム材料の摩擦係数を接触面圧 p の関数として定式化した。なお、式(2)で定義される μ_{local} はせん断強さ τ と接触圧力 p の比で表されており、応力次元での摩擦係数 (垂直応力とせん断応力の比) に及ぼす接触面圧の影響を数理的に表現可能である。同モデルによって得られる摩擦構成式を有限要素法などに組み込むことで、システムの摩擦力に及ぼすバルク変形の効果を数値シミュレーションにより予測することが可能となる。

4. 研究成果

本研究では以下の2つの成果を得た。

(1) 図4は図1に示した開発した摩擦試験機で使用した試験片の模式図である。バルク変形が接触面積に及ぼす影響を調査するために接触面に複数の溝を付け、容易にバルク変形が生じるようになっている。図5は摩擦力の接触面積の同時計測の実験結果です。同図に示すように、時間とともに変化する接線力が変化する様子、さらには図中の写真から明らかなように (黒色部が真実接触領域) 真実接触部が変化する様子とともに計測できていることがわかる。

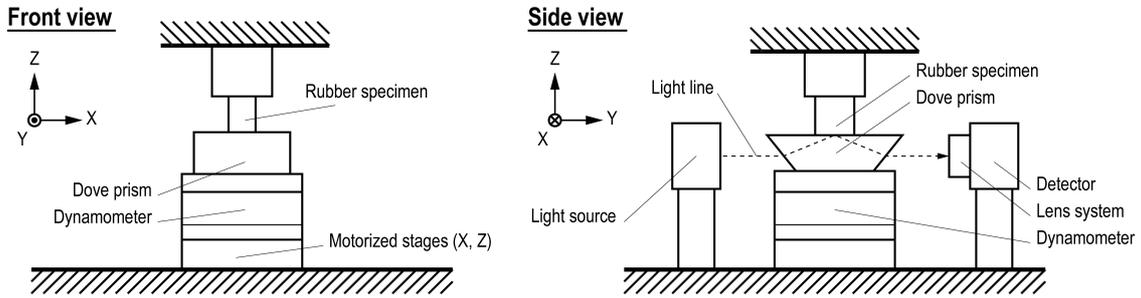


図1 開発した摩擦試験機概念図(左図:正面図,右図:側面図)

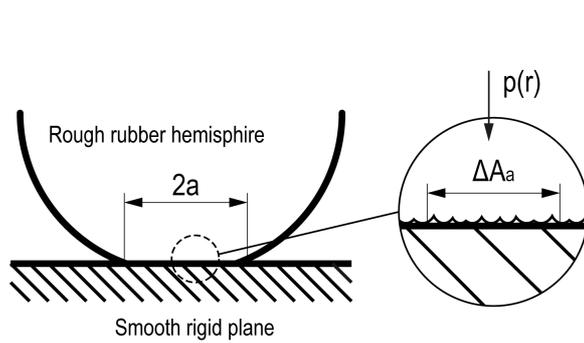


図2 解析モデル

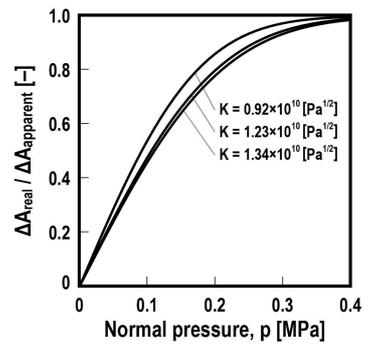


図3 接触面積と接触面圧の関係

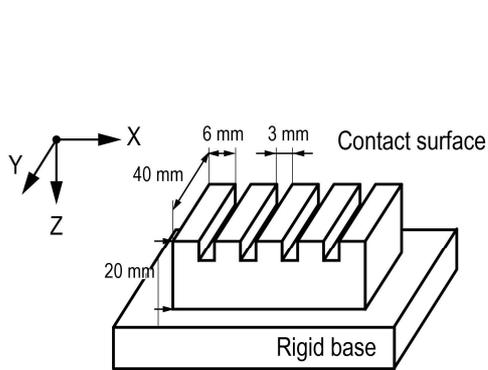


図4 使用した試験片

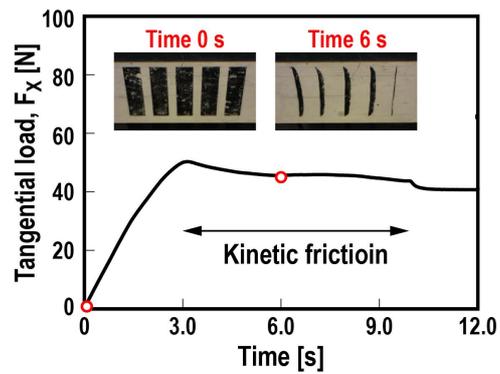


図5 接触面積と摩擦力の計測結果

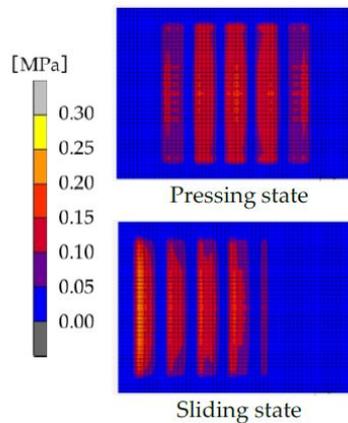
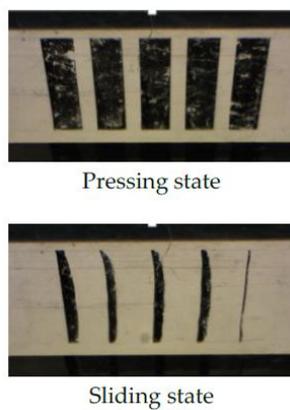


図6 実験結果と有限要素法解析の結果(引用:S, Ozaki et. al., *Lubricants*, Vol.6, No.2, 2018, p.38)

せん断によってバルク変形が生じて真実接触面積が減少している様子が明瞭に可視化されている。以上より、バルク変形が摩擦力変化を生み出すメカニズムである真実接触面積のバルク変形依存性を可視化できる摩擦試験機の開発が達成された。

(2) 上述の式(2)に示す本研究で導出した摩擦構成式を有限要素法解析に組み込んで、図4と図5の実験結果の数値シミュレーションを行った。その結果を図6に示す。左図が実験結果、右図がシミュレーション結果である。同図を比較すると、実現象がよくシミュレートされていることが分かる。以上より、本研究で導出した摩擦構成式を組み込んだ有限要素解析によりバルク変形をともなうゴム摺動材料の摩擦特性を精度良くシミュレートできる計算アルゴリズムの開発が達成された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Shingo Ozaki, Keishi Mieda, Takeru Matsuura, Satoru Maegawa, Simple Prediction Method for Rubber Adhesive Friction by the Combining Friction Test and FE Analysis, *Lubricants*, Vol.6, No.2, 2018, p.38, DOI: 10.1299/jsmecmd.2017.30.213 (査読有)

〔学会発表〕(計4件)

前川覚, 糸魚川文広, 中村隆, 松岡広成, 福井茂寿, 粗さを有するゴム半球と剛平面の接触における摩擦係数の接触応力依存性とその簡易推定法, トライボロジー会議2017春東京, 2017

前川覚, 摺動するゴム材料の接触面観察と摩擦メカニズムの考察, トライボロジー会議 2017 秋高松, 2017

尾崎伸吾, 松浦健, 三枝恵司, 前川覚, 摩擦試験と有限要素解析を組み合わせたゴム凝着摩擦の簡易予測法, 第30回 計算力学講演会, 2017

Takashi Matsuura, Satoru Maegawa, Shingo Ozaki, Rate-and state-dependent friction model for rubber-metal contact based on the elastoplastic formulation, 44th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 2017