

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03833

研究課題名（和文）フレキシブル材料のヒステリシス摩擦力を制御するための新技術の開発

研究課題名（英文）New technology for controlling hysteresis friction force of flexible 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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ゴムなどの粘弾性材料が硬い粗面上を摺動する場合、粗面突起がゴムを変形させる際に生じる変形抵抗がヒステリシス摩擦力として現れる。一般的に、ヒステリシス摩擦力を設計するためにはゴム材料の  $\tan \delta$ （弾性の性質と粘性の性質のどちらが支配的であるかを示す物理量であり貯蔵弾性率と損失弾性率の比として表される）を制御する機会が多い。一方、本研究では、ゴム材料の表面近傍に剛性分布や密度分布を付与することで、従来の粘弾性特性制御とは異なる観点からヒステリシス摩擦力の設計が可能であることを実験により検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、フレキシブル材料の摩擦設計の定量化に向けた技術的なブレークスルーを与えることである。バルクの剛性分布付与を摩擦制御に積極的に利用する本手法では、体系化された構造力学の既存知識（非線形FEM技術なども含む）をフルに活用できるうえに、3Dプリンタなどの最先端のバルク材料創製技術との融合により既往の縛りから解放された新しい発想のもとで摩擦力の定量設計が可能になると期待される。

研究成果の概要（英文）：When a viscoelastic material such as rubber slides on a hard rough surface, the deformation resistance generated when the rough surface asperities deform the rubber appears as hysteresis friction force. Generally, for designing hysteresis friction force,  $\tan \delta$  (it is a physical quantity indicating whether the elastic or viscous property is dominant and, expressed as the ratio of storage elastic modulus to loss elastic modulus of the rubber material) is often focused on as designing parameter. On the other hand, this study demonstrates through numerical simulations and experiments that hysteresis friction force can be designed from a different perspective from the conventional control of viscoelastic properties by imparting stiffness and density distributions near the surface of the rubber material.

研究分野：トライボロジー

キーワード：ソフトマテリアル ゴム ヒステリシス摩擦 摩擦制御 スティックスリップ 接触面観察

### 1. 研究開始当初の背景

タイヤやシールなどの従来の機械要素に加えて、ソフトアクチュエータや生体調和型デバイスなどの新技術においても、フレキシブル材料の摩擦制御がそのキーテクノロジーとなるケースは多い。これまでに、超低摩擦・超低摩耗ポリマーの開発、バイオミメティクスリ表面による摩擦制御技術の創製など数多くの最先端研究が実施され、ソフトマテリアルのトライボロジーに対する学術界および産業界の期待は年々高まっている。

トライボロジー技術の産業応用に向けての共通した課題は、摩擦力設計の定量化である。例えば、「摩擦係数を 0.1 にする」と定量的に設計できる範囲（設計式の導出が可能な範囲）は、流体潤滑が担保される一定の作動条件下や表面が理想環境下などに限られており、その範囲を拡大することは容易ではない。多くの場合では、今ある系よりも摩擦を大きくする、または小さくするためにはどのような手段が有効かといった定性的な効果が論じられ、定量予測が可能な設計式の導出には至らない場合が多い。これは、摩擦力を直接決定づける真実接触部でのせん断強度が材料の組み合わせや雰囲気環境、作動条件などの違いにより敏感に変化して、その予測が極めて困難であることに起因する。したがって、表面科学の知見に基づいて表面相互作用の制御を目指す従来の摩擦設計手法においては、摩擦力の定量設計のハードルは高い。

### 2. 研究の目的

以上の背景のもと本研究では、フレキシブル材料の内部構造設計（剛性や密度の空間分布を設計すること）に基づいてヒステリシス摩擦力の新たな制御技術を提案する。具体的には、剛性や密度の空間分布の不均一性により発現するヒステリシス摩擦増減効果の理論的および実験的なバックグラウンドを整備して、フレキシブル材料の新しいトライボ設計技術の確立を目指す。

### 3. 研究の方法

図 1 に従来のヒステリシス摩擦制御機構と本研究で提案する剛性分布付与による摩擦制御手法の違いを示す。従来のヒステリシス摩擦の発現機構（同図左側）は以下の通りである。ゴム表面は突起と接触して鉛直方向に圧縮され、突起を通過した後は時間遅れを持ちながら緩やかに回復する。この緩和速度はゴムの粘弾性特性により支配され、粘性成分が大きいゴムほど回復に要する時間は長くなる。その結果、接触長さは突起頂点を前後に非対称となる。接触応力の水平方向成分が摩擦力となるので、この接触応力分布の非対称性がヒステリシス摩擦の発生の要因となる。一方で本研究では、同図右側に示すように、ゴム表面に積極的に剛性不均一性を付与することで、接触応力の不均一性を発現させる。その結果、例えば、粘性効果の低いゴム材料であっても、高剛性部分を乗り越える際に接触応力の不均一性が発現し、疑似的にヒステリシス摩擦を生み出すことができる。

以上のコンセプトを実証するために本研究では下記の 2 段階に分けての実験を実施した。

#### (1) 硬質粒子充填モデルエラストマーでの検証試験

第一段階として、モデル試験片（PDMS に直径 300 μm のセラミクス粒子を分散させている）を用いた摩擦試験を行い、粒子分散密度が摩擦係数に及ぼす影響を調査した。試験片情報、相手面粗さ面の情報は図 2 の通りである。また、使用した摩擦試験機と作動条件は図 3 の通りである。厚さ 1 mm のシート状のモデル試験片と頂角 90°の鋸歯状の亚克力製相手面を垂直荷重 30 N で接触させて、その後すべり速度 0.5 mm/s で摺動させた。凝着摩擦の影響を無視できるように潤滑油として PAO: Poly-alpha-olefin 4cSt を接触面に塗布した。亚克力製相手面の山のピッチは 1 mm であり、すべり方向と垂直の向きに粗さの向きを設定した。セラミクス粒子の数密度は、図 2 の通り、4 水準の異なる試験片を準備した。なお、摩擦力と垂直荷重は相手面を駆動するための直動自動ステージ上に設置した動力計で計測した。また、摺動中の微小粒子の位置の変化は、接触面上面に取り付けた CCD カメラにより可視化することができる。

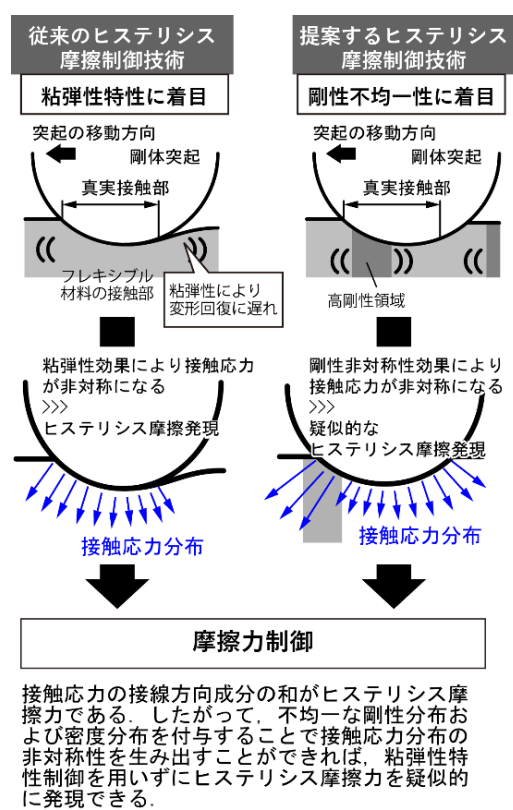


図 1 提案する摩擦制御手法の概要

(2) 硬質フィラー充填タイヤ用ゴムでの検証試験

第二段階として、フィラーとしてシリカやカーボンブラック、硬質粒子としてシリカゲルや炭酸カルシウムを充填したスチレンブタジエンゴムを試験片として使用した。それぞれの添加粒子の平均粒子径と濃度は図4中の表の通りである。摩擦試験は、図5の試験機を利用した。研磨紙に硬質微粒子を充填した半球ゴム試験片を押し付けて垂直荷重 13 N を与える。相手面の研磨紙は回転ステージ上に取り付けられており、回転ステージを駆動することで接触面にすべり速度 1 m/s ですべりを与える。なお、摩擦力と垂直荷重はゴム試験片上に設置した動力計により計測した。また、相手面として粗さが異なる4つの研磨紙を準備した。

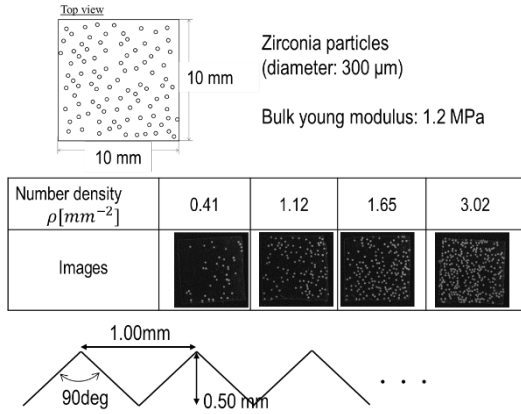


図2 検証試験(1)における試験片

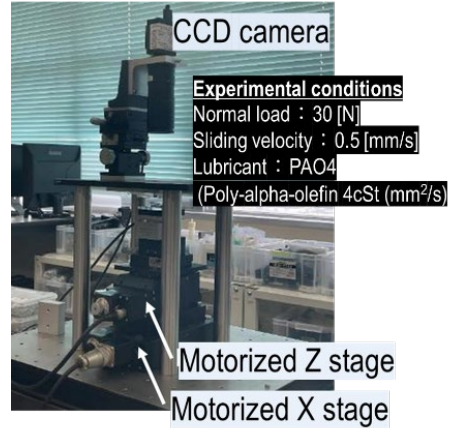


図3 検証試験(1)における実験装置

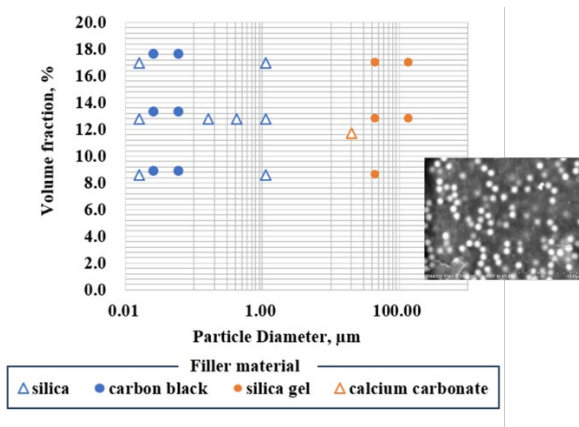


図4 検証試験(2)における試験片

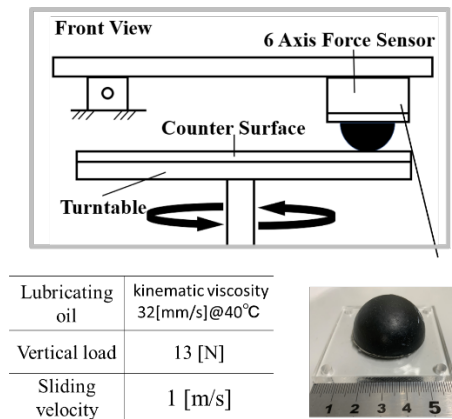


図5 検証試験(2)における実験装置

4. 研究成果

(1) 硬質粒子充填モデルエラストマーでの検証試験

図6に検証試験(1)で計測した摩擦係数とセラミクス粒子の重点密度の関係を示す。同図より、充填された硬質粒子数が増加するとともに摩擦係数が線形に増加している様子がわかる。これは図1に示したように硬質粒子が相手面粗さの頂点を乗り越える際に垂直応力分布の時間変化が頂点通過前後で非対称となり、時間平均をとると疑似的なヒステリシス摩擦成分が生じたことに起因する。それぞれの粒子が独立して運動していると仮定すると、単一粒子の摩擦力増大量×粒子数が系全体での摩擦力増大量となる。すなわち、数密度が増加するにしたがい、摩擦係数が増加することになる。なお、剛性分布付与により接触応力の不均一性を生じさせ、疑似的にヒステリシス摩擦を増大させる本研究のコンセプトは次のように解釈することもできる。ゴム表面が相手面突起を乗り越える際に、垂直方向と水平方向に振動することで生じるエネルギー散逸量が摩擦力となる。剛性分布を付与することで、ゴム表面が相手面突起に引っ掛かりやすくなり（Interlocking 効果が生じて）エネルギー散逸量が増加する。その結果、ヒステリシス摩擦力は増加する。

図7に、数密度を最大とした場合での微小粒子の位置の様子のスナップショットと、任意に選んだ3点（図7中の赤の場所、薄青の場所、濃青の場所）でのすべり方向の変位の時間変化である。突起が粒子に近づくにつれて緩やかに移動し、突起を乗り越えた瞬間にすべり方向と

は逆方向に急激に移動している。その結果、鋸波状のスティックスリップのような波形を示している。このことから、微小粒子を充填することで水平方向振動が誘発され、その結果エネルギー散逸量が増えて摩擦力が増加したと解釈することができる。以上より、硬質粒子分散に基づく剛性分布付与により摩擦力を増大させることが可能であること、粒子数の調整により摩擦力を定量的に設計できることが明らかとなった。

(2) 硬質フィラー充填タイヤ用ゴムでの検証試験

図8にスチレンブタジエンゴムに充填した硬質粒子の粒子径と摩擦係数増大効果の関係を示す。なお、同図の縦軸は、粒子を充填していないゴムの摩擦係数で規格化した、各条件でのゴムの摩擦係数である。例えば、縦軸が2となる条件では、硬質粒子充填なしのゴムの2倍の摩擦係数を有することに対応する。ここで、Roughness 1 から 4 の順に研磨紙の粗さは大きくなっている。同図より、数十  $\mu\text{m}$  程度の硬質粒子が充填されている場合、大きな摩擦係数増加が生じている。また、摩擦係数の増大量は研磨紙の粗さが大きいほど顕著に現れている。硬質粒子とかみ合いやすくなる条件（粗さの突起曲率半径と粒子直径に近い値であり、かつ突起の傾斜が大きい場合）で摩擦力増大効果が作用することがわかる。なお、図9に示す通り、硬質粒子が相手面とうまくかみ合い摩擦係数増大効果が見込める場合、耐摩耗性が低下するというトレードオフの関係に注意が必要である。剛性分布付与（硬質粒子充填）により相手面粗さとかみ合い性が向上する場合において摩擦力増大効果が見込まれるが、その際の摩耗速度は増加してしまうことが実験より明らかとなった。

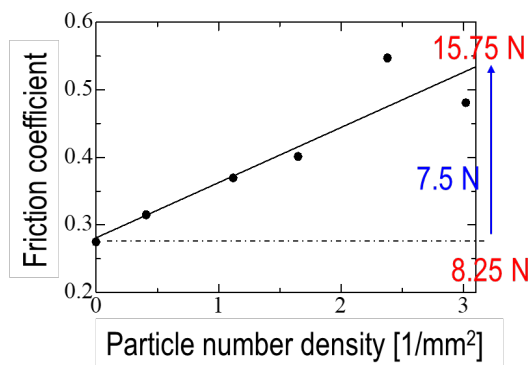


図6 硬質粒子充填量と摩擦係数の関係

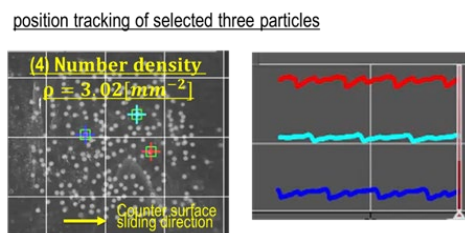


図7 硬質粒子の水平方向変位の時間変化

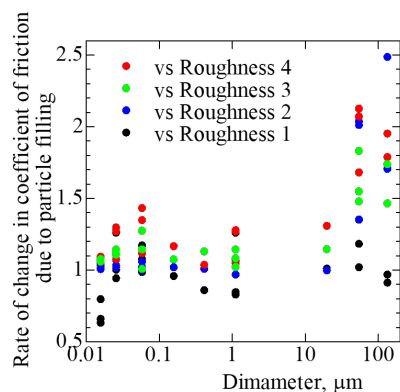


図8 硬質粒子の大きさと摩擦係数の関係

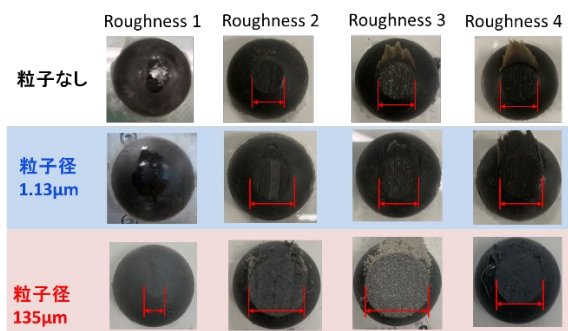


図9 硬質粒子充填ゴムの摩耗の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 吉田出海, 劉曉旭, 前川覚, 糸魚川文広
2. 発表標題 硬質粒子を含有したゴムフィルムの摩擦係数制御に関する研究
3. 学会等名 トライボロジー会議2021 秋 松江
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田出海, 劉曉旭, 前川覚, 糸魚川文広
2. 発表標題 ゴム材料のしゅう動面に生じる局所的な摩擦振動が摩擦係数に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会第20回機素潤滑設計部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木祐輔, 糸魚川文広, 前川覚, 劉曉旭
2. 発表標題 潤滑下でのゴムブロックの摩擦特性（形状変形と動摩擦力の関係について）
3. 学会等名 トライボロジー会議2023 春 東京
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤一志, 劉曉旭, 前川覚, 糸魚川文広
2. 発表標題 硬質粒子配合ゴムのヒステリシス摩擦に関する研究
3. 学会等名 トライボロジー会議2023 春 東京
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoru Maegawa, Kazushi Ito, Xiaoxu Liu, Fumihiro Itoigawa, Yuki Watanabe, Naoya Amino
2. 発表標題 Rubber Friction Control Focusing on Lateral Viscoelastic Deformation Induced by Stiffness Inhomogeneity
3. 学会等名 9th International Tribology Conference, Fukuoka 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazushi Ito, Xiaoxu Liu, Satoru Maegawa, Fumihiro Itoigawa, Yuki Watanabe, Naoya Amino
2. 発表標題 Effect of Contained Hard Particle Size and Density on Rubber Friction Properties
3. 学会等名 9th International Tribology Conference, Fukuoka 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤一志, 劉曉旭, 前川覚, 糸魚川文広, 渡辺幸, 網野直也
2. 発表標題 ゴム内部の硬質粒子のサイズや密度がヒステリシス摩擦に及ぼす影響
3. 学会等名 第34回エラストマー討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前川覚, 伊藤一志, 糸魚川文広, 渡辺幸, 網野直也
2. 発表標題 ゴム表面の剛性不均一性に着目したヒステリシス摩擦制御に関する研究
3. 学会等名 第34回エラストマー討論会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------