

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01236

研究課題名(和文) 低速クリープをともなう固着現象を合理的に記述する摩擦則の構築

研究課題名(英文) Construction of friction laws that rationally describe stiction accompanied by slow creep

研究代表者

中野 健 (Nakano, Ken)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授

研究者番号：30292642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：著名なクーロンの研究以後、固体の接触面に作用する摩擦力には、静摩擦と動摩擦と呼ばれる二種類が存在すると言われている。しかし、対向面に固着して相対的に静止しているように見える物体の相対速度を精密に計測すると、実は極低速で運動しているとの報告が複数あり、静摩擦の存在は必ずしも学術的に立証されていない状態にある。そこで本研究では、低速すべりをともなう固着現象を合理的に記述する摩擦則の構築を目的として、理論と実験と数値解析による国際共同研究を推進した。その結果、二種類の理想系(剛接触系と柔軟接触系)において、低速すべりをともなう疑似的な固着モード(動的固着モード)が発現する合理的なシナリオを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、自然法則の一つとして高校の物理にも登場する「クーロンの摩擦則」の一般常識を覆し、これまで「固着＝静摩擦」という先入観に基づき曖昧に理解されてきた摩擦現象を根本から見直すべきであることを示唆している。固体摩擦理論の原理原則の再構築を通して、固体摩擦が関与する広範な分野の科学と技術の中に、新たな潮流を生み出すことが見込まれる。

研究成果の概要(英文)：Since the famous Coulomb studies, we believe there exist two types of friction (i.e., static and kinetic friction). However, several precise measurements revealed that an extremely slow slip occurs in a stick phase, meaning that the existence of static friction is not proven scientifically. In this project, we conducted international collaborating studies (including theoretical, experimental, and numerical analysis) to construct the friction law that rationally explains the stick phase with slow slippage. As a result, we found two mechanisms of dynamic stiction modes showing quasi-stick phases with slow slippage in two ideal mechanical systems (i.e., the rigid- and flexible-contact systems).

研究分野：トライボロジー

キーワード：摩擦則 静摩擦 動摩擦 固着 すべり

1. 研究開始当初の背景

我々が生活する実世界には、固体間の接触面が無数に存在する。接触面が相対的に運動すると、そこには例外なく不可逆な機械-熱エネルギー変換が発生し、それを総じて我々は摩擦現象と呼ぶ。摩擦現象は、我々の日常生活のスケール(衣服の快適性を左右する肌と布地の摩擦、機械のエネルギー効率を決定づける金属部品間の摩擦など)はもとより、ナノスケール(素過程としての原子間の摩擦)からギガスケール(地震の発生源となる大陸プレートと海洋プレートの摩擦)まで、あらゆるスケールに生じる基本的な物理現象である。

自然法則の一つとして高校の物理に登場する「クーロンの摩擦則」は、二種類の摩擦(静摩擦と動摩擦)の存在を前提としており、「固着=静摩擦」および「すべり=動摩擦」という直観的な図式は、一般常識となっている。しかし、(接線負荷を受ける)固着面は(一般に見落とすほど極低速な)すべりを伴うという実験事実(Heslot et al, Phys Rev E, 1994 など)を受けて、専門家の間では静摩擦の存在が疑問視され始めている。とりわけ、固着とすべりを繰り返す弛緩振動(スティックスリップ不安定性)は地震の発生機構と考えられていることから、地震学の分野では、一般常識との矛盾を回避するために、静摩擦と動摩擦を区別しない数学的形式を備えた「速度状態依存則」が最有力とされている。しかし、物理的な意味が不明瞭なパラメータを多数含む速度状態依存則の信憑性を巡る議論は、未だに収斂する気配がない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、「静摩擦とは何か?」という学術的問いのもと、低速すべりをともなう固着現象を合理的に記述する摩擦則の構築を目的として、研究代表者がその重要性を発見した面内ミスアライメント(Nakano & Popov, Phys Rev E, 2020)と呼ばれる幾何学的概念を物理モデルに導入し、理論と実験と数値解析による国際共同研究を推進した。その結果、二種類の理想系(剛接触系と柔軟接触系)において、低速すべりをともなう疑似的な固着モード(動的固着モード)が発現する合理的なシナリオを見出した。本研究の成果は、「クーロンの摩擦則」の一般常識を覆し、これまで「固着=静摩擦」という先入観に基づき曖昧に理解されてきた摩擦現象を根本から見直すべきであることを示唆している。固体摩擦理論の原理原則の再構築を通して、固体摩擦が関与する広範な分野の科学と技術の中に、新たな潮流を生み出すことが見込まれる。

3. 研究の方法

低速すべりをともなう固着現象を合理的に記述する摩擦則を構築するために、剛接触系(接触面積が十分に小さく、摩擦力が単一の接触点に集中すると見なせる力学系)と柔軟接触系(接触面積が大きく、摩擦力が接触面内に分布することを考慮する力学系)という二種類の系を対象に研究を実施した。

3.1. 剛接触系の固体摩擦

剛接触系の固体摩擦については、研究代表者が提案する「動的固着理論」の研究(Nakano & Popov, Phys Rev E, 2020)に基づいて研究を実施した。同理論は、マクロな固着状態の発現のために古典的な静摩擦は必ずしも必要なく、面内ミスアライメントが生み出す動摩擦の回転により、力学的な過減衰状態が生まれ、その結果として疑似的な固着状態が生まれることを予測している。そこで、同理論の鍵を握る「動摩擦の回転」を実測可能な実験系を構築し、数値シミュレーションの計算結果と比較して、同理論を実験的に検証した。

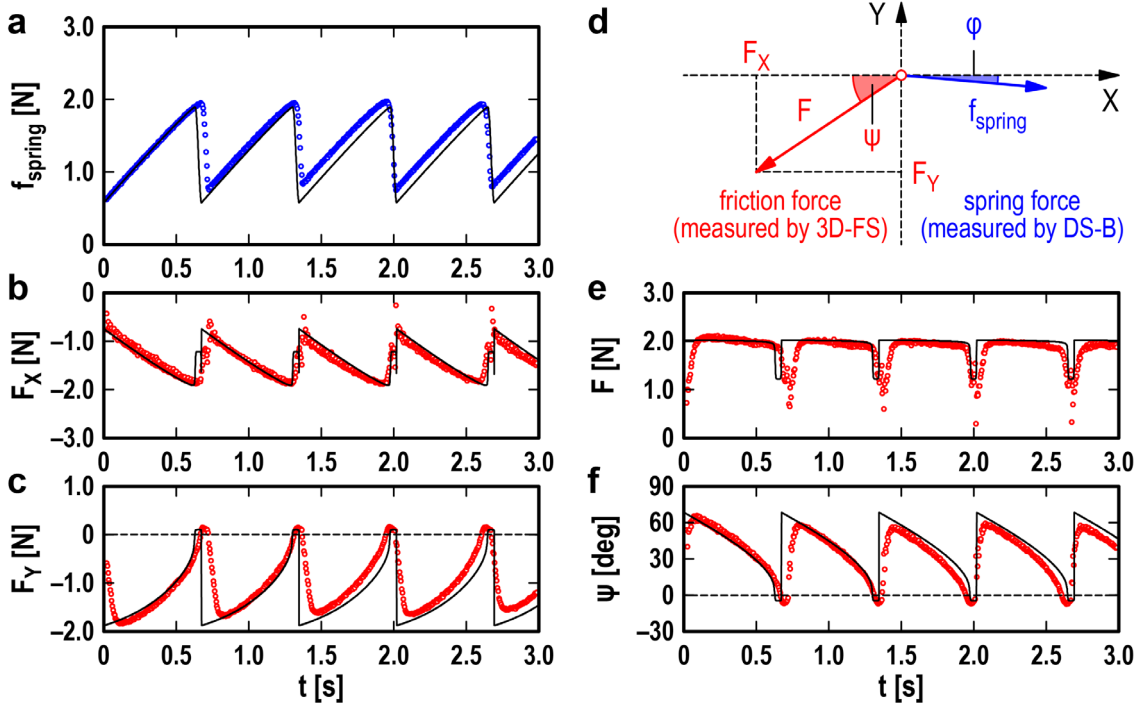
3.2. 柔軟接触系の固体摩擦

柔軟接触系の固体摩擦については、研究代表者が提案する「粘弾性ファンデーション理論」の研究(Nakano & Kono, Front Mech Eng, 2020)に基づいて研究を実施した。粘弾性ファンデーション理論とは、粘弾性要素の配列で粘弾性体をモデル化した上で、剛プローブとの間に作用する摩擦力を力学的に扱う理論である。零自由度系(プローブの位置を固定したすべり摩擦系)と一自由度系(プローブの法線方向の運動を許容して荷重を一定としたすべり摩擦系)について調査されてきた同理論を高度化した上で、拡張した二自由度系(更にプローブの接線方向の運動を許容したすべり摩擦系)の動態を数値シミュレーションにより調査した。

4. 研究成果

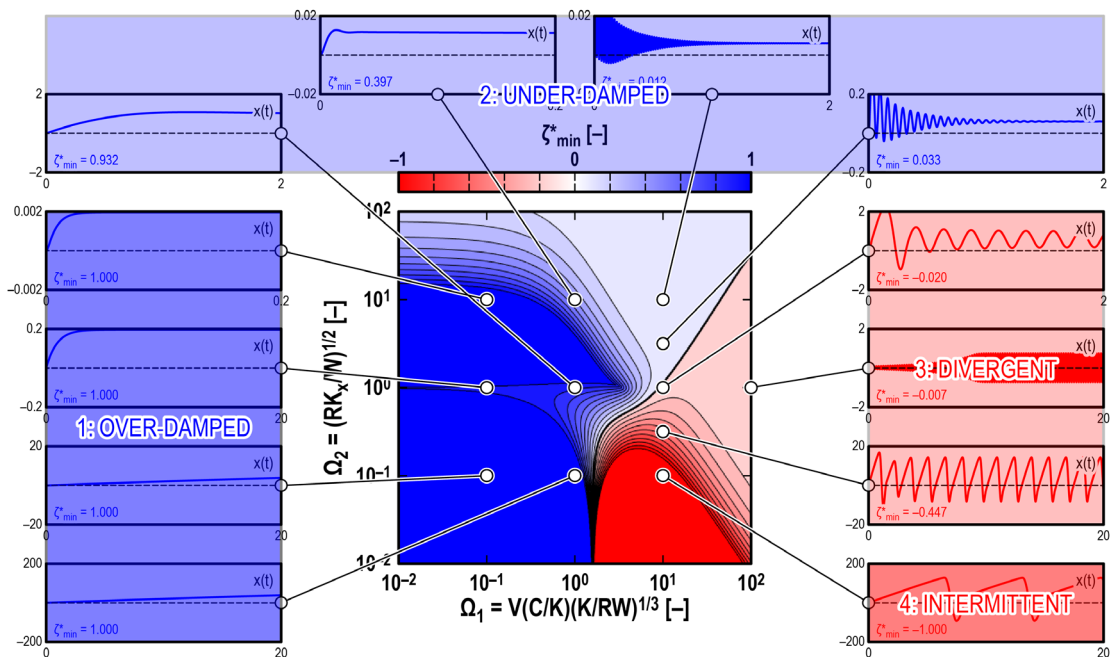
4.1. 剛接触系の固体摩擦

動的固着理論の鍵を握る「動摩擦の回転」を実測可能な実験系を構築し、数値シミュレーションの計算結果と比較した。代表例を下図に示す。両者は定性的にも定量的にも一致していることから、動的固着理論を実験的に実証することができた。



4.2. 柔軟接触系の固体摩擦

粘弾性ファンデーション理論を二自由度系に拡張し、系の動態を数値シミュレーションにより調査した。代表例を下図に示す。本理論では不安定性の因子となる明示的な摩擦則を与えていないにもかかわらず、二種類の不安定性が発現することがわかった。特に、下図の「4」では、低速すべりを伴う疑似的な固着状態が現れており、新たな動的固着モードを発見した。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T. Watanabe, S. Hatanaka, K. Nakano	4. 巻 18
2. 論文標題 Dimensionless numbers and master curves for sliding friction from the Kelvin-Voigt viscoelasticity of solids	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Tribology Online	6. 最初と最後の頁 406-416
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2474/trol.18.406	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 T. Watanabe, K. Nakano	4. 巻 19
2. 論文標題 Two origins for bell-shaped velocity-dependent friction coefficient: Kelvin-Voigt or standard linear solid viscoelasticity	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Tribology Online	6. 最初と最後の頁 167-177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2474/trol.19.167	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 5件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 中野 健
2. 発表標題 マクロな静摩擦の異なる描像「動的固着モード」について
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Nakano
2. 発表標題 Contact and friction of elastomers
3. 学会等名 International Symposium on Automotive Tribology 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Nakano
2. 発表標題 Virtual damping generated by friction vector rotation
3. 学会等名 AsiaBrake 2023 Conference and Exhibition (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中野 健
2. 発表標題 固着時に現れる極低速滑りと動的固着モードについて
3. 学会等名 トライボロジー会議
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Nakano, V. L. Popov
2. 発表標題 Friction vector rotation regulates the slow-to-fast slip transition
3. 学会等名 International Tribology Conference Fukuoka 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Nakano, T. Watanabe
2. 発表標題 Does solid viscoelasticity stabilize sliding systems?
3. 学会等名 International Tribology Conference Fukuoka 2023 (招待講演) (国際学会)
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			
ドイツ	ベルリン工科大学			