

補助事業番号 2019M-116

補助事業名 2019年度 超潤滑-摩擦遷移状態における超潤滑の安定性・持続性制御の確立補助事業

補助事業者名 法政大学理工学部機械工学科 平野 元久

## 1 研究の概要

超潤滑-摩擦遷移現象(図3)として非平衡状態で生ずるカタストロフィック相転移の機構を原子鎖の原子集団の自己組織化現象と捉えて解明する。原子スケールの局所的な動的相互作用によって、原子鎖が原子集団として摩擦状態へ大域的に相転移が起こる機構を解明する。

## 2 研究の目的と背景

ナノ摩擦モデルを非線形力学系として扱い非線形振動・カオスの視点からナノ摩擦の非線形動力学に着目し、ナノ摩擦の複雑な動的力学挙動の制御機構を解明し超潤滑制御法を解明する。非平衡状態において超潤滑-摩擦遷移臨界現象として現れる相転移を自己組織化現象あるいは協力現象として捉え、自己組織化の制御パラメータを解明することにより、異なるスケールの階層間で現れる摩擦現象相互の相関を解明し、ナノ摩擦の知見をマクロ摩擦系に適用可能とすることによって、マクロスケールで低摩擦・長寿命を実現する超潤滑材料の設計指針を創出する。

## 3 研究内容

### 「超潤滑安定性解析法に関する研究」

一次元原子鎖が摩擦周期ポテンシャルを受けて運動する原子摩擦モデルの非線形動力学特性を一次元原子鎖の重心速度の時系列解析によって調べ、1/2次、1/3次分数調波振動、和差調波振動の発生を見出した。原子摩擦モデルを特徴づけるパラメータ空間において、3つの特徴的な摩擦特性領域として、(1)超潤滑領域(**S領域**)、(2)摩擦領域(**F<sub>α</sub>領域**)、そして最も特異的な振舞いを示す(3)超潤滑-摩擦遷移現象を示す**F<sub>β</sub>領域**を明らかにした。これにより、すべり速度と摩擦ポテンシャル振幅をパラメータとして摩擦状態を決定する摩擦相図を明示した。特に、**F<sub>β</sub>領域**では当初超潤滑状態が現れるが、予測できない時刻に突然に摩擦が生じすべり速度が急落する超潤滑-摩擦遷移現象が現れることを観測した。超潤滑のパラメータ領域から、速度の初期値を増加すると原子振動の非線形性が強くなり、すべり速度の臨界値を超えて超潤滑から摩擦に転じるときに超潤滑が不安定となるが、この不安定性をフロケ理論による周期解の安定・不安定判別法から計算されるフロケ乗数によって定量化できることを明らかにした。

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

清浄結晶表面の摩擦の原子論から始まった超潤滑研究はその応用対象を広げ、微小機械・ナノマシンの範疇を超えて自動車エンジン等のマクロスケールの実用機械も対象としている(ジャン・ミシェル・マルタン, アリ・エルデミア, 平野元久 訳, 超潤滑:摩擦の消失, パリティ第34巻第1号, 83-91 (2019)). 本研究課題提案先の研究領域の達成目標にも唱えられているように, 力学物性の基礎を固め, 現象論を超えて論理的な研究戦略に沿って新しい材料機能の創成に取り組む研究姿勢が重要となる. 世界情勢を鑑みると, 日本の機械工学にとっても多品種・高付加価値製品の生産技術の強化が国力強化にとって急務となっている. 本研究領域が掲げる達成目標は, これからの工業製品の価値創造の基礎技術になると理解している. 本提案課題の研究代表者として, 研究期間後半においては企業と連携して潤滑材料設計指針の産業適用性検証の対象となれるような研究推進を図りたいと考えている.

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究提案の研究代表者は, ナノ力学物性として現れる原子レベル摩擦を物性論の立場から調べ、1990年に摩擦発生の原子論的機構解明を果たすと同時に, 原子レベル摩擦で現れる特異現象として摩擦消失現象の存在を理論的に証明し, この現象を超潤滑と命名した. 超潤滑が現れる基本原理は接触面の非整合な原子配列構造に由来し, このような非整合接触では接触面間の原子間隔比が無理数となり, 表面が準静的にすべると表面原子に作用する力がすべり方向に沿って互いに打ち消し合うことにより超潤滑が現れる. 原子間力顕微鏡をはじめとするナノ先端計測技術によって実現した原子レベル摩擦測定は, ナノ摩擦理論と直接対比可能な実験データを提供し接触面整合性に起因する摩擦異方性や非整合接触面の超潤滑の理論予測を実証した. しかしながら, 未だナノ摩擦表面の非整合構造に起因する超潤滑は工業レベルで稼働する現実機械の複雑な摩擦に適用されるには至っていない. この背景には, 現実的に大面積の清浄表面を大気雰囲気下で実現することの難しさに加えて, 摩擦の本性として, 局所的なナノ摩擦を理解できても必ずしも大域的に現れるマクロ摩擦を理解できるとは限らない複雑さと, 摩擦は単純モデルの要素論では理解が困難な対象であることが認識されてきた.

これに対し, 本研究代表者は要素論を超えて摩擦の複雑さと扱いきさを克服し, ナノ摩擦の知見と原理をマクロ摩擦で実現する技術の開発研究に取り組むことが学理的・実用的に必須と考えてきた. 今回このような問題に対して, 革新的・挑戦的研究の推進をねらいとする本研究課題の提案にあたり, 研究代表者はナノ摩擦の挙動に関する知見をマクロ摩擦で機能させるには, ナノ摩擦を複雑性科学として捉えることが有効であるとする着想を得た.

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

1. M. Hirano, S. Inoue and K. Kimura, Atomistic Friction Phase Diagram and Non-linear Dynamical Effects in Frictional Energy Dissipation, The 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT) April 24-27, 2019, Kagoshima, Japan

2. M. Hirano, K. Kimura, and S. Hasebe, Non-Linear Dynamical Effects in Frictional Energy Dissipation, The 2nd International Conference on Numerical Modelling in Engineering (NME 2019) August 19-22, 2019 Beijing, China. 招待講演.
3. 平野元久, 超潤滑-摩擦遷移現象と非線形ダイナミクス, 第9回 兵庫県立大学計算科学連携セミナー, 2019年7月31日(水) - 8月1日(木), 兵庫県立大学神戸情報科学キャンパス
4. M. Hirano, Non-linear Dynamical Effects in Frictional Energy Dissipation, The 46th Leeds-Lyon Symposium on Tribology September 2-4, 2019 Lyon, France.
5. 平野元久, 摩擦エネルギー散逸における非線形動力学効果, 日本機械学会 2019年度年次大会オーガナイズドセッション マイクロナノ理工学: nmからmmまでの表面制御とその応用, 2019年9月8日(日)~11日(水) 秋田大学
6. M. Hirano, Non-linear dynamical effects in frictional energy dissipation in an atomistic friction model, International Workshop on Contact Mechanics and Friction, Berlin, 14-17 October 2019. 招待講演.
7. M. Hirano and S. Inoue, Non-linear dynamical effects in frictional energy dissipation for atomistic friction model, 2019 STLE Tribology Frontiers Conference, October 20-23, 2019 Chicago, Illinois (USA). (Spotlight Presentationに選出).
8. 長谷部真也, 平野, 原子摩擦モデルの摩擦エネルギー散逸における非線形動力学効果, 日本機械学会第10回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, アクティシティ浜松 2019年11月20~21日.

## 7 補助事業に係る成果物

### (1) 補助事業により作成したもの

JKA報告書(2019M-116).pdf

<http://hirano-lab.ws.hosei.ac.jp/jka.html>

### (2) (1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 法政大学理工学部(ホウセイダイガクリコウガクブ)

住 所: 〒184-8584

東京都小金井市梶野町3-7-2

担 当 者: 教授(きょうじゅ)

担 当 部 署: 機械工学科(キカイコウガクカ)

E - m a i l: [hirano@hosei.ac.jp](mailto:hirano@hosei.ac.jp)

U R L: <http://mech.ws.hosei.ac.jp/index.html>