

補助事業番号 2022M-201

補助事業名 2022年度 層状物質薄膜の超潤滑発現機構解に関する補助事業

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

物質と物質が接触すると摩擦が現れる。20世紀の機械文明の発展には摩擦との格闘の歴史が刻まれている。動力を伝えるのに必要な摩擦をいかにして取り込み、無駄な摩擦をどうなくすのか、この絶妙なバランスを求めて人類は知恵をしぼってきた。近代の摩擦研究は18世紀産業革命の機械技術振興の社会的要請に源流をもち、その成果は産業に活かされた。

摩擦消失の超潤滑の実現は、人類発展の基幹を担ってきた機械技術の夢である。超潤滑が夢にとどまらず研究課題として登場したのは、数百年の摩擦研究の歴史の中では最近のことといえる(図2)。

申請者らは摩擦・超潤滑理論により、完全結晶表面の静摩擦・動摩擦・超潤滑の発現機構を理論的に解明した。これによれば、接触界面の格子定数が無理数比のとき原子間力が打消し合い摩擦消失の超潤滑が発現する(図1(b))。各国ではナノ構造(図2(a))の超潤滑観測実験が精力的に進められ、論文は近年急増している(図3)。超潤滑は限られたナノ構造や二次元物質界面(図2(b))の実験室環境での観測が進められているが、本申請の目指す超潤滑の社会実装も将来の地球規模の産業振興・環境保全にとって極めて重要である。しかしながら、現在までにマクロスケールの超潤滑は観測されていない。本申請者は、創始した超潤滑理論をマクロの超潤滑材料の開発に是非とも展開したいと考え、その実システムへの実装実現のための研究構想を練り上げ、層状物質材料内部のすべり面に超潤滑系を組込む内部超潤滑膜創製に挑む。

図1(c)は本研究の学術的独自性として、超潤滑系の構成要件である格子不整合界面を材料内部に内在する超潤滑材料薄膜の概念図を示す。本研究成果は宇宙用機器開発において潤滑油の蒸発・固化の問題回避のために使用される二硫化モリブデン(MoS₂)、二硫化タングステン(WS₂)等固体潤滑材料の改質に活かされる。

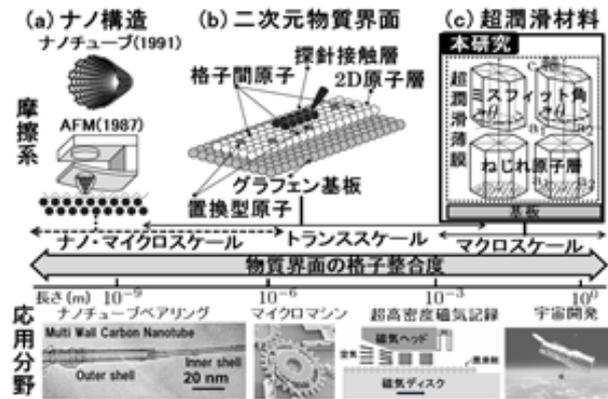


図1 ナノ-マクロスケールに見られる摩擦。摩擦がスケール間で異なるとき遷移(トランス)領域が現れる。

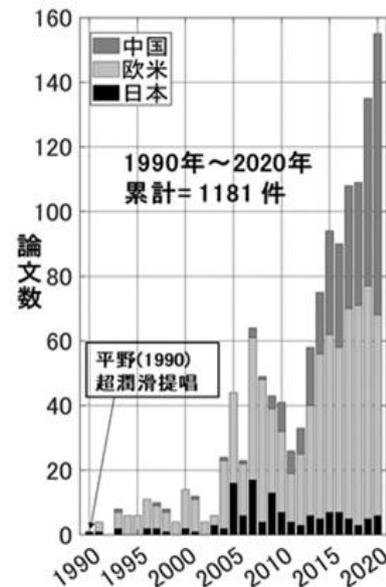


図2 超潤滑の論文動向

本研究の独自性は、①超潤滑微簿粒子晶の創製法と、②超潤滑薄膜の成膜法の2点にある。本申請に先立ち、2021年度JKA(研究補助)「層状物質内不整合界面層生成による内部超潤滑の発現機構解明 補助事業」により、作製した超潤滑微簿粒子結晶が良好な単結晶であることが判明し、この成果を受けて本申請により格子不整合界面層の成膜化技術と軸受への応用展開を速やかに加速することが最善と考え今回の応募に至った。さらに、本申請の提案によって実用化の可能性を示すことができた場合、「JKA研究補助の開発研究」等への応募の展開を目指したい。

2 研究の目的

本研究の目的は、格子不整合界面を層状物質材料内部に組込む内部超潤滑の新概念・新機能を実現し、極小摩擦係数 $\mu \sim 0.0001$ の超潤滑材料を開発することである。このために以下の課題解明をはかる。

1. 層状物質材料内部のすべり面に強せん断加工等を用いて格子不整合を導入する潤滑性微小結晶の材料組織制御機構の解明。
2. 微小結晶の配向制御・焼結による超潤滑薄膜の成膜機構の解明。

これにより、層状物質内部のすべり面での摩擦・超潤滑理論と超潤滑安定条件の理解が進展し、マクロスケール超潤滑界面の設計指針や新しい超潤滑系が見出され超潤滑実装の可能性が広がる。

図3は、超潤滑発現に必要な格子不整合界面を材料内部に組む内部超潤滑の概念図を示す。二硫化モリブデン(MoS_2)は代表的な潤滑性層状物質であり、AB原子層内(図3(a))の結合は強い一方、AB原子層間のファンデルワールス(vdW)ギャップ(図3(a))の結合は非常に弱く、原子層はvdWギャップで容易にすべり、このことから MoS_2 の良好な潤滑性が説明されている。これらは宇宙機器開発で潤滑油の蒸発・固化の問題を回避するために用いられる。

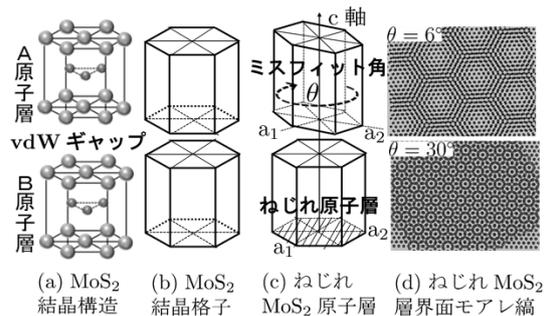


図3 内部超潤滑

3 研究内容

(1) 層状物質内不整合界面層生成による内部超潤滑の発現機構解明

http://hirano-lab.ws.hosei.ac.jp/index_j.html

図10は研究方法の概略を示す。予備検討(図4(a)と(b))として、薄膜の出発材料とする潤滑性層状物質(MoS_2 , WS_2 等)の粉末試料(平均粒径 $\sim 5 \mu\text{m}$)から、1個の粉体粒子(粒径 $\sim 7 \mu\text{m}$)を選別して観察・分析したところ、電子線後方散乱回折(EBSD: Electron Back Scattered Diffraction Pattern)から、この粉体粒子は1つの板状の単結晶であることが判明した(図4(b))。この結果に基づき、以下の板状微小結晶の改質・成膜のプロセスを解明する。

(1) 板状微小結晶の分離・分級 (図4の①)

- (2) 微小結晶内部の格子不整合導入 (図4の②)
- (3) 格子不整合超潤滑結晶の薄膜化 (図4の③)
- (4) 超潤滑薄膜の摩擦評価&(図4の④)

図5は、層状物質材料 WS_2 の圧縮・せん断等変形によるひずみ付加によって層状物質原子層間でのせん断変形の有無を電子顕微鏡によって観察可能であることを示した予備検討結果である。本研究計画ではミスフィットによる微細組織の調質が層状物質内のすべり面の格子不整合・結晶性・機械特性・摩擦特性に与える効果を解明する

一つの物理現象を解明しようと多くの研究者が挑むとき多くの新概念や物理的方法が導入され研究が加速されたように、本研究計画の実現は超潤滑社会実装のブレークスルーとなり、超潤滑研究の起爆剤となって超潤滑材料開発に凌ぎが削られる状況がもたらされることが期待される。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—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

本補助事業者 平野元久は、NTT研究所(1982-2003)において情報機器のナノトライボロジー研究に従事し、世界に先駆けて原子的清浄表面の摩擦発生の原子論的機構を理論的に解明した[M. Hirano and K. Shinjo, Atomistic locking and friction, Phys. Rev. B41, 11837-11851 (1990)]. さらに、金属・半導体などの現実系で超潤滑:摩擦消失状態の存在を理論的に導き、超潤滑を新し

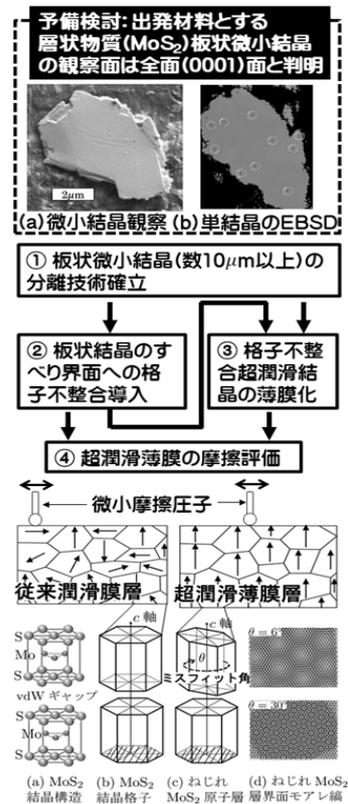


図4 研究方法

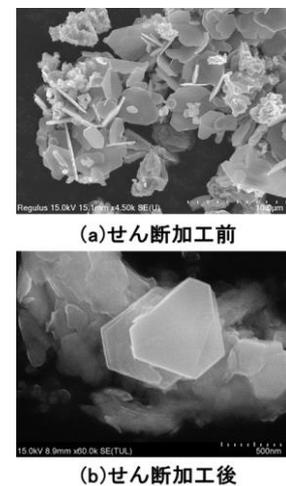


図5 WS_2 原子層のせん断変形

い概念として提唱した[M. Hirano, Atomistics of superlubricity, Friction, 2 (2), 95–105 (2014)]. 実験では超潤滑理論の摩擦異方性の理論予測を実証した[M. Hirano, K. Shinjo, R. Kaneko, and Y. Murata, Observation of superlubricity by scanning tunneling microscopy, Phys. Rev. Lett. 78, 8, 1448–1451 (1997)]. これらの成果を著書[M. Hirano, Friction at the Atomic Level: Atomistic Approaches in Tribology, Wiley–VCH, Weinheim, Germany, 2018.]としてまとめた. このように, 超潤滑研究の開拓・発展に大きく貢献し超潤滑研究のパイオニアと目されている.

これまでに, 超潤滑は限られた微視的な系で観測されてきたが, 巨視的スケールのマクロ界面の原子配列制御の困難の壁によって, 超潤滑の社会実装の実現が阻まれてきた. 地球規模の産業振興と環境保全の両立にとって, この困難の克服の挑戦は重要課題となっている. 本研究補助事業では, 格子不整合界面を層状物質材料内部に組込む内部超潤滑の新概念・新機能を実現し, 極小摩擦係数 $\mu \sim 0.0001$ の超潤滑材料を開発することを目的とし, 層状物質材料内部のすべり面に強せん断加工等を用いて格子不整合を導入する潤滑性微小結晶の材料組織制御機構の解明をはかった. これにより, ナノ超潤滑の機構をマクロ界面に組込む新しい超潤滑材料開発への応用展開を目指す.

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

1. 久保田優作・平野元久, 超潤滑の動力学的安定性, 日本機械学会2021年度年次大会 (2021 9.5–8, 2021, 千葉大学) 口頭発表(一般) S113–19.
2. M. Hirano, Y. Shimizu, H. Inoue, Dynamical systems in atomistic friction models, 2022 JSME–IIP/ASME–ISPS Joint Int. Conf. on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) August 28–31, 2022, Nagoya

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(2022M–201).pdf

[http://hirano-lab.ws.hosei.ac.jp/JKA%E5%A0%B1%E5%91%8A%E6%9B%B8\(2022M-201\).pdf](http://hirano-lab.ws.hosei.ac.jp/JKA%E5%A0%B1%E5%91%8A%E6%9B%B8(2022M-201).pdf)

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: 〒184-0002(半角)

東京都小金井市梶野町3-7-2

担 当 者: 教授 平野 元久 (キョウジュ ヒラノ モトヒサ)

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

U R L: http://hirano-lab.ws.hosei.ac.jp/index_j.html