

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01747

研究課題名（和文）ファンデルワールス層状構造 - ナノカーボン分子界面超潤滑における荷重と積層の相関

研究課題名（英文）Correlation between load and stacking structure of superlubricity at Van der Waals layered structure / nanocarbon molecules interface

研究代表者

佐々木 成朗（Sasaki, Naruo）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：40360862

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,700,000円

研究成果の概要（和文）：層状物質や半導体、金属界面の滑り過程の荷重・サイズ依存性を、最大静摩擦力と動摩擦力の変化として調べた。分子力学シミュレーションにより、層状物質界面（C60/グラファイト界面）における低荷重領域での平均水平力の荷重依存性から、封入C60分子の配向が走査方向の異方性よりも動摩擦に大きな影響を与えることが判明した。分子配向は押し込み硬さにも強く影響する。低荷重領域（平均荷重 < 1 nN）でアモントン・クーロン則は成立するが、高荷重領域では破綻した。一方、半導体シリコンでピラー列を構成した表面では、ピラー径がマイクロメートル以下になる領域で動摩擦特性から静摩擦特性に移行することを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マクロサイズの部品の摩耗や破壊に起因する機械の故障による経済損失は年間10数兆円に達するため、摩擦の制御は産業上の要請である。一方、ナノメートルサイズでは部品に働く相互作用由来の摩擦や凝着が著しく増大し、物体のスムーズな運動は著しく阻害される。したがって研究成果の社会的意義は、摩擦制御の指導原理の提案による微細部品のスムーズな稼働を通して、次世代省エネルギー技術の開発、ひいてはSDGsやカーボンニュートラルに貢献することである。一方、ナノサイズからマクロサイズまで全ての階層で現れる摩擦現象の普遍的な物理法則をマルチスケールトライボロジーという新たな学理に落とし込むという学術的意義も有している。

研究成果の概要（英文）：The load and size dependences of the sliding process at the layered material interface and the semiconductor interface were investigated as the change in the maximum static and the kinetic friction forces due to the compression. At the layered material interface, a molecular mechanics simulation of shear in the low-loading region was performed to study the load dependence of the mean lateral force by changing the orientation of the intercalated fullerene molecules. It was found that the Amonton-Coulomb law held and that the effect of the orientation of the intercalated molecules gave greater influences on the kinetic friction coefficient than that of the anisotropy of the scanning direction. At the silicon pillar interface, kinetic to static friction transitions occurred for the Si pillar with its diameter less than the sub-micrometer. This research project provides guidelines for the structural design and load control of thin film interfaces aimed at control of superlubricity.

研究分野：ナノトライボロジー

キーワード：超潤滑 フラーレン グラフェン 接触 分子シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

ナノメートルスケールから摩擦を制御することは、次世代省エネルギー技術の開発に必要不可欠である。申請者らはこれまでに、ファンデルワールス層状物質(グラファイト)でナノカーボン分子(フラーレン)をはさんだ分子ベアリング界面が、数 10 pN オーダーのナノスケール超潤滑を示すことを摩擦力顕微鏡測定と分子シミュレーションで明らかにしている。しかし摩擦力顕微鏡探針による荷重が 100 nN 以下の時、荷重を増加させても、動摩擦力は摩擦力顕微鏡の原子分解能以下の不確かさの範囲内でほとんど変化しないことの物理的起源は未解明のままであり、数 pN オーダー以下の低荷重領域の超潤滑特性解明によるナノトライボ制御法の提案が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、主に理論シミュレーションの立場から、ファンデルワールス層状物質/ナノカーボン分子界面や金属、半導体シリコン界面が超潤滑性を示すメカニズムを、荷重やサイズ、積層構造の間の相関に着目して解明することである。具体的には(1)ナノスケール真実接触部(ナノ界面粗さ)の概念の導出および(2)マルチスケール摩擦制御への展開を目指す。特に、ファンデルワールス層状物質/ナノカーボン界面や半導体シリコン界面において、従来マイクロメートルレベルで止まっていた真実接触部の概念を、ナノスケールにダウンサイズして、界面のナノスケール真実接触構造を定量的に評価するのに役立つモデル界面とみなす点に、本研究の特徴がある。

3. 研究の方法

理論班の佐々木(電通大・研究代表者)は、ファンデルワールス層状物質/ナノカーボン分子界面の超潤滑の荷重依存性の分子力学シミュレーションを行う。具体的には、我々のグループで開発した Tersoff ポテンシャル-拡張 LJ ポテンシャル複合モデルによる構造最適化を用いて、層状物質界面にかかる荷重を増加させたときの、最大静摩擦力(最大水平力)と動摩擦力(平均水平力)の変化を求める。例えばグラフェン/C₆₀/グラフェン界面の場合、我々の予備計算では、高荷重領域で摩擦力に非線形性が出現するが、低荷重領域ではアモントン・クーロン則(摩擦が荷重に比例する)に従うことが分かっている。本研究計画では低荷重の超潤滑領域でアモントン・クーロン則の成立可否を確かめる。実験班の三浦(愛知教育大)は研究分担者として層状物質界面や半導体界面の摩擦顕微鏡(FFM)測定を行い、摩擦力の荷重依存性のデータを得る。摩擦力の荷重依存性の計算データを測定データと比較し、積層構造を調節して、最適な界面構造を探索する。理論と実験間のフィードバックにもとづいて、研究計画を推進する。

4. 研究成果

(1) グラフェン/C₆₀/グラフェン超潤滑界面における圧縮硬さの C₆₀ 分子配向依存性

グラフェン/C₆₀/グラフェン界面において理論的に見出されている二種類の安定配向の圧縮特性を調べた。AB 積層配向(C₆₀の六員環をグラフェンシートに向けて近似的にグラファイトの AB 積層と等価になっている配向)と OT 積層配向(C₆₀の単一の炭素原子をグラフェンシートに向けて、グラフェンシートの六員環のホローサイトに吸着している配向)でグラフェン/C₆₀/グラフェン界面の安定構造を計算したところ、グラフェン-グラフェン間距離は AB 積層配向では 1.31 nm, OT 積層配向では 1.32 nm となった。次に圧縮時の有効硬さ解析から、界面の硬さを支配する因子が分子配向によって異なることが判明した。つまり全系の硬さを決定する因子は、AB 積層配向では荷重によらず常に相互作用由来の硬さ成分だが、OT 積層配向では荷重の増加に伴い、相互作用由来の硬さ成分から C₆₀由来の硬さ成分へ移行することが分かった。(論文投稿準備中)

(2) グラフェン/C₆₀/グラフェン超潤滑界面における C₆₀ 分子配向依存性と走査方向依存性との比較

二種類の安定配向とグラフェンシートの走査方向の依存性(異方性)が摩擦の荷重依存性に与える影響を 1 nN 以下の低荷重領域で比較した。上層のグラフェンシートを整合性の良い方向を中心に±30度の範囲で水平走査した。界面を c 軸方向に圧縮しながら水平走査を行い、平均水平力を平均荷重でプロットしたところ、AB 積層配向と OT 積層配向のいずれの場合も低荷重領域でアモントン・クーロン則が成立することが分かった。さらに重要な点は、各積層配向でみた走査方向依存性よりも、各走査方向における配向依存性の方が摩擦の荷重依存性に強く影響を及ぼしていることである。従ってグラフェン/C₆₀/グラフェン積層界面の摩擦係数 μ には走査方向依存性より分子配向依存性の方が強く影響を与えることが分かった。このことをエネルギー的な

観点で解釈すると、より安定な分子配向の方が、シートの走査過程でシートにより安定に固着するためと説明できる。このように、典型的な二種類の準安定配向構造における低摩擦（超潤滑）特性を、走査方向依存性（異方性）との関係で明らかにし、層状物質界面の設計における分子配向制御の重要性を示すことが出来た。（論文投稿準備中）

(3) シリコンピラー界面摩擦のサイズ依存性

ナノメートルサイズからマイクロメートル以上のサイズまで表面テクスチャを作製して、各スケールの摩擦を連続的に追跡することを考えた。実験班の三浦が、シリコン製のピラー（柱状）構造を人工的に作製した。ピラー直径 ϕ 、ピラー周期 d 、ピラー高さ h によって、ピラー構造の単位胞が決まる。次にピラー径をマイクロメートルからナノメートルまで系統的に微細化したピラーを用意して、単一のシリコンピラー表面上のナノスケール摩擦を摩擦顕微鏡（FFM）で測定したところ、平均水平力がナニュートンからピコニュートンオーダーまで急激に減少することを見出した。平均水平力はピラー径 $\phi=10\text{ }\mu\text{m}$ のときに 1 nN だが、ピラー径 $\phi=300\text{ nm}$ では 10 pN オーダーまで減少している。これは各径の水平力曲線の変化から、動摩擦から静摩擦（スティック状態）への遷移が生じていることを示している。平均水平力とは逆に、有効水平硬さ k_{eff} は増加した。そこで、理論班の佐々木は FFM 探針とピラー表面の接触領域、FFM 探針、ピラー、FFM のカンチレバーの水平硬さをそれぞれ、 k_{contact} 、 k_{tip} 、 k_{p} 、 k_{lever} と定義して、

$$k_{\text{eff}} = (k_{\text{contact}}^{-1} + k_{\text{tip}}^{-1} + k_{\text{p}}^{-1} + k_{\text{lever}}^{-1})^{-1},$$

の式から測定結果を評価した。これらの結果から、力学特性がサブマイクロメートルスケールで大きく変化していることが分かり、ナノスケールとマクロスケールのトライボロジーを接続するヒントはサブマイクロメートルスケールにあることが示唆された。（AIP Advances **12**, 025225-1/3 (2022)）

(4) MEMS in TEM による超高強度のナノコンタクトのせん断分離測定と解釈

界面接触に関して国際共同研究を行った。ペンシルバニア大の佐藤博士、R. W. Carpick 教授、東京都市大の藤田教授により MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）の微細加工デバイス（銀でコーティングしたシリコン対向探針）を接触させて銀のナノコンタクトを生成したせん断測定が行われ、UHV-TEM（超高真空透過型電子顕微鏡）測定と組み合わせてその場観察（in situ MEMS-in-TEM 測定）し、垂直荷重とせん断応力と、接触面積の同時観察が遂行された。従来、銀は滑りに誘起される塑性接合成長を示すことが知られているが、今回の測定で銀のナノコンタクトには高い応力がかかっているにもかかわらず極めて限られた塑性変形しか示さないことが分かった。これは、ナノコンタクトにはほとんど欠陥が含まれていないため、降伏点でのミーゼス応力が銀の理想的な強度に近づき、ナノコンタクトの強度が従来の予想の 20 倍近くも大きくなったことに起因している。逆にナノコンタクトを引き剥がすために必要な力はマクロスケールのモデルから予想される値をはるかに下回り、80%以下の力で剥がされることも分かった。これは、せん断が連続体レベルで理論的に予測されたナノスケールの引き離し力を減少させることを示しており、初めて直接観測されたものである。ナノコンタクトの力学を理解するためには、せん断時の原子レベルの効果と引きはがし時の連続体モデルの効果が混在するメソスコピック領域の接触力学で理解できることが分かった。（Nature Communications **13**, 2551-1/10 (2022)）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 佐々木成朗	4. 巻 37
2. 論文標題 ITC Fukuoka 2023におけるシンポジウムセッションの見どころ "Mesoscopic Tribology Bridging the Gap between Nano- and Macro-scale"	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 月刊トライボロジー	6. 最初と最後の頁 18-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐々木成朗	4. 巻 66
2. 論文標題 巻頭言 学術講演会の国際化に向けた予行演習	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 表面と真空	6. 最初と最後の頁 513-513
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.66.513	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐々木成朗	4. 巻 62
2. 論文標題 超低摩擦を目指す ~ フラーレンC60封入グラファイトフィルム	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 油空圧技術	6. 最初と最後の頁 47-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naruo Sasaki	4. 巻 2023
2. 論文標題 Nanotribology at carbon interface formed by graphene and fullerenes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JSAP Review	6. 最初と最後の頁 230207-1/6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/jsaprev.230207	査読の有無 無
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 Takaaki Sato, Zachary B. Milne, Masahiro Nomura, Naruo Sasaki, Robert W. Carpick, Hiroyuki Fujita	4. 巻 13
2. 論文標題 Ultrahigh Strength and Shear-Assisted Separation of Sliding Nanocontacts Studied in situ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2551-1/10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-30290-y	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 該当する

1. 著者名 Yoshiki Ishii, Ryoto Yanagisawa, Nobuyuki Watanabe, Masahiro Nomura, Naruo Sasaki, Kouji Miura	4. 巻 12
2. 論文標題 Large lateral contact stiffness on Si nanopillar surfaces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025225-1/3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0082255	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 佐々木成朗	4. 巻 91
2. 論文標題 グラフェンとフラレンで形成されたカーボン界面のナノトライボロジー	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 536-541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.91.9_536	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanae Hirao, Naruo Sasaki	4. 巻 2022
2. 論文標題 Scaling law of Moire contact and superlubricity at twisted graphene interface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) Extended Abstracts	6. 最初と最後の頁 B1-3-02-1/2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Reona Minowa, Hidehiro Sakurai, Naruo Sasaki	4. 巻 2022
2. 論文標題 Load dependence of friction and fracture of self-assembled sumanene monolayer based on molecular dynamics simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) Extended Abstracts	6. 最初と最後の頁 B1-3-03-1/2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 平尾佳那絵, 佐々木成朗	4. 巻 2022春
2. 論文標題 ツイストグラフェン界面におけるモアレ接触と超潤滑の一般則	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 トライボロジー会議 2022春 東京 予稿集	6. 最初と最後の頁 D1-1/2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藪和怜央, 櫻井英博, 佐々木成朗	4. 巻 2022春
2. 論文標題 分子動力学法にもとづくスマネン自己組織化単分子膜の摩擦・摩耗の荷重依存性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 トライボロジー会議 2022春 東京 予稿集	6. 最初と最後の頁 B3-1/2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐々木成朗	4. 巻 66
2. 論文標題 グラフェンのはく離を表現する有効ポテンシャルモデルの開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 トライボロジスト	6. 最初と最後の頁 347-352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18914/tribologist.66.05_347	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計48件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 佐々木成朗
2. 発表標題 基調講演「ナノスケール摩擦・接触の素過程とエネルギー散逸」
3. 学会等名 電子情報通信学会 システムナノ技術に関する特別研究専門委員会主催 第5期 第3回研究会 「ナノ構造・表面におけるエネルギー散逸制御と局所物性解析技術の最先端」(招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yusuke Otaka and Naruo Sasaki
2. 発表標題 Molecular dynamics studies of indentation and sliding processes on 6H-SiC(0001) Surface
3. 学会等名 UEC-SAARC Symposium on Emerging Technologies (USSET 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 友藤康司, 北川敏一, 佐々木成朗, 小林大, 川勝英樹
2. 発表標題 原子間力顕微鏡の定量的測定にむけた自己組織化単分子膜探針
3. 学会等名 ISSPワークショップ「表面界面スペクトロスコピー2023」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naruo Sasaki
2. 発表標題 Friction beyond scale at twisted graphene interface
3. 学会等名 Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2023 (JVSS2023) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yu Fukushima, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Theoretical description of nanomechanics of the contact state of twisted graphene interface
3. 学会等名 Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2023 (JVSS2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Otaka, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Molecular dynamics studies of indentation and sliding processes on 6H-SiC(0001) surface
3. 学会等名 Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2023 (JVSS2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kaito Kwarada, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Simulation of nanomechanics of an inner carbon nanotube in double-walled nanotube
3. 学会等名 Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2023 (JVSS2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Minoru Fujisawa, Naruo Sasaki
2. 発表標題 The size effect of surface defects on atomic-scale peeling of graphene
3. 学会等名 Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2023 (JVSS2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Tani, Takuya Mizoguchi, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Superlubricity of C60 molecular bearings - effect of interlacated molecular orientation
3. 学会等名 Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2023 (JVSS2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木成朗
2. 発表標題 新たな世界を切りひらけ ~摩擦ゼロを目指す材料設計~
3. 学会等名 茨城県立竜ヶ崎第一高等学校 電気通信大学見学会 模擬講義 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naruo Sasaki
2. 発表標題 Scaling Law of Moire Contact and Friction at Twisted Graphene Interface
3. 学会等名 9th International Tribology Conference Fukuoka2023 (ITC Fukuoka 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yu Fukushima, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Nanomechanics of Twisted Graphene
3. 学会等名 9th International Tribology Conference Fukuoka2023 (ITC Fukuoka 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Otaka, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Molecular Dynamics Simulation of Waiting-time Dependence of Real Contact Area and Sliding Friction on 6H-SiC(0001) Surface
3. 学会等名 9th International Tribology Conference Fukuoka2023 (ITC Fukuoka 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Tani, Hayato Kinoshita, Takuya Mizoguchi, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Superlubricity of C60 molecular bearings - effect of interlacated molecular orientation
3. 学会等名 9th International Tribology Conference Fukuoka2023 (ITC Fukuoka 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福島侑, 佐々木成朗
2. 発表標題 ツイストグラフェンのナノ力学
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会, オンライン開催
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木成朗
2. 発表標題 研究紹介「界面接触・摩擦のナノ力学：マルチスケールの理解を目指して」
3. 学会等名 ナノトライボロジー研究センター第四回シンポジウム, 電気通信大学, 東京
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 溝口拓也, 鈴木勝, 三浦浩治, 佐々木成朗
2. 発表標題 C60/グラフェン界面摩擦の荷重依存性におけるC60分子配向効果
3. 学会等名 ナノトライボロジー研究センター第四回シンポジウム, 電気通信大学, 東京
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大鷹有亮, 佐々木成朗
2. 発表標題 6H-SiC(001)表面における真実接触面積と滑り摩擦の待機時間依存性の分子動力学シミュレーション
3. 学会等名 ナノトライボロジー研究センター第四回シンポジウム, 電気通信大学, 東京
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yu Fukushima, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Nanomechanics of twisted graphene
3. 学会等名 ナノトライボロジー研究センター第四回シンポジウム, 電気通信大学, 東京
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河原田海渡, 佐々木成朗
2. 発表標題 二層カーボンナノチューブにおける内層チューブのナノ力学
3. 学会等名 ナノトライボロジー研究センター第四回シンポジウム, 電気通信大学, 東京
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷侑亮, 佐々木成朗
2. 発表標題 C60ベアリングの分子スケール摩擦係数に関する研究
3. 学会等名 ナノトライボロジー研究センター第四回シンポジウム, 電気通信大学, 東京
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤澤穰, 佐々木成朗
2. 発表標題 グラフェンシートの剥離における表面欠陥のサイズ効果
3. 学会等名 ナノトライボロジー研究センター第四回シンポジウム, 電気通信大学, 東京
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yu Fukushima, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Nanomechanics of twisted graphene
3. 学会等名 量子科学研究センター第2回学生ポスター発表会, 電気通信大学, 東京
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideki Kawakatsu, Toshikazu Kitagawa, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Tailoring AFM Tips for Improved Quantitative Measurement
3. 学会等名 NAMIS Marathon Workshop, National Tsing Hua University, Taiwan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木成朗
2. 発表標題 省エネ・創エネに向けた摩擦・凝着システムの開発
3. 学会等名 2022年度秋季オープンキャンパス企画, ナノトライボロジー研究センター 研究室紹介 「摩擦研究が拓く未来のエネルギー科学」, 電気通信大学, 東京
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木成朗
2. 発表標題 超潤滑システムと環境発電技術
3. 学会等名 電気通信大学 産学官連携センター 第127回研究開発セミナー「電気通信大学のカーボンニュートラル戦略」, 電気通信大学産学官連携センター, 東京 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木成朗
2. 発表標題 摩擦の科学がひらく持続可能な社会
3. 学会等名 電気通信大学、東京農工大学、東京外国語大学 西東京三大学連携グローバル人材育成プログラム 2022年度 夏季高校生グローバルスクール, オンライン開催 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yu Fukushima, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Nanomechanics of Graphene
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kanae Hirao, Yu Fukushima, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Universal scaling law of Moire contact and superlubricity at twisted graphene interface
3. 学会等名 The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Reona Minowa, Hidehiro Sakurai, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Load dependence of friction and fracture of self-assembled sumanene monolayer based on molecular dynamics simulation
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kanae Hirao, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Scaling law of Moire contact and superlubricity at twisted graphene interface
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平尾佳那絵, 佐々木成朗
2. 発表標題 ツイストグラフェン界面におけるモアレ接触と超潤滑の一般則
3. 学会等名 トライボロジー会議2022 春 東京
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 袁和怜央, 櫻井英博, 佐々木成朗
2. 発表標題 分子動力学法にもとづくスマネン自己組織化単分子膜の摩擦・摩耗の荷重依存性
3. 学会等名 トライボロジー会議2022 春 東京
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木成朗
2. 発表標題 まさつの科学
3. 学会等名 電気通信大学・調布市 サイエンスカフェChofu 第23回, オンライン開催(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊師芳和, 鈴木勝, 谷口淳子, 佐々木成朗, 石川誠, 三浦浩治
2. 発表標題 AT-cut水晶振動子を利用したC60単結晶のナノ滑り摩擦
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川誠, 石井義記, 柳沢亮人, 渡辺宣朗, 野村政宏, 鈴木勝, 佐々木成朗, 三浦浩治
2. 発表標題 シリコンナノピラー上の横接触ばねの振る舞い
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 袁和怜央, 松山倫太郎, 櫻井英博, 佐々木成朗
2. 発表標題 原子間力顕微鏡探針によるスマネン単分子膜の潤滑・摩耗シミュレーション
3. 学会等名 第145回表面技術協会講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平尾佳那絵, 佐々木成朗
2. 発表標題 ツイストグラフェン界面のモアレ接触と超潤滑の相関
3. 学会等名 第145回表面技術協会講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Reona Minowa, Rintaro Matsuyama, Hidehiro Sakurai, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Transition of tribological characteristics of sumanene self-assembled monolayer by AFM tip indentation
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science, ISSS-9 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kanae Hirao, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Mechanism of anisotropy of nano-scale friction based on mathematical definition of nano-scale contact
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science, ISSS-9 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平尾佳那絵, 佐々木成朗
2. 発表標題 ツイストグラフェンのモアレ変形によるナノスケール接触の定義と摩擦への影響
3. 学会等名 2021年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 袁和怜央, 松山倫太郎, 櫻井英博, 佐々木成朗
2. 発表標題 AFM探針押し込みによるスマネン自己組織化膜のトライボ特性の転移
3. 学会等名 2021年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木成朗
2. 発表標題 原子レベルの摩擦が引き起こす現象 (インタビュー動画配信)
3. 学会等名 電気通信大学調布祭 類研究室紹介 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平尾佳那絵, 岡本遼路, 佐々木成朗
2. 発表標題 二次元凝着力分布によって説明されるナノスケール界面接触のメカニズムと摩擦への影響
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 袁和怜央, 松山倫太郎, 櫻井英博, 佐々木成朗
2. 発表標題 金(111)表面に吸着したスマネン単層膜上の滑り摩擦の分子動力学シミュレーション
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平尾佳那絵, 佐々木成朗
2. 発表標題 グラファイト界面のナノスケール摩擦異方性の2次元凝着力分布を用いた解析
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kanae Hirao, Naruo Sasaki
2. 発表標題 Moire pattern reflects contact area at nanofrictional graphene/graphite interface
3. 学会等名 MITC2020 : THE 3rd MALAYSIAN INTERNATIONAL TRIBOLOGY CONFERENCE (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木成朗
2. 発表標題 新たな世界を切りひらけ ~摩擦ゼロを目指す材料設計~
3. 学会等名 渋谷教育学園渋谷中学校(中高大連携協定校)オンライン研究室見学(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

(1) 電気通信大学 佐々木成朗研究室 http://nanotribo.g-edu.uec.ac.jp/index.html
(2) 「ナノの世界の摩擦（ネバネバ）を見る・制御する」, 佐々木（成）研究室紹介 https://www.uec.ac.jp/research/information/opal-ring/0006605.html
(3) 「ナノトライボロジー研究センター紹介」動画, 電気通信大学HP (2021) https://www.youtube.com/watch?v=YRMc9Legp6k

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
研究分担者	三浦 浩治 (Miura Kouji) (50190583)	電気通信大学・ナノトライボロジー研究センター・客員教授 (12612)	

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1件

国際研究集会 Symposium "Mesoscopic Tribology Bridging the Gap between Nano- and Macro-scale", 9th International Tribology Conference, ITC Fukuoka 2023	開催年 2023年～2023年
--	--------------------

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		
米国	University of Pennsylvania		