

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03846

研究課題名(和文)光オペランド摩擦解析による界面ダイナミクスの解明

研究課題名(英文)Explication of interface dynamics by optical operand friction analysis

研究代表者

後藤 真宏 (GOTO, Masahiro)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・ナノアーキテクトニクス材料研究センター・主席研究員

研究者番号：00343872

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：「光によりマクロレベルの摩擦を変化させられるのか？」という課題に取り組むべく、光オペランド摩擦解析手法を新たに提案、装置を構築し、研究を実施した。その結果、金属酸化物トライボコーティングの摩擦係数は、光の照射によりマクロな摩擦領域においても変化することが明らかとなった。また、その摩擦係数変化は、光波長依存性があることも突き止めた。その要因は、コーティングの光吸収による表面電子励起の影響、表面の化学反応によるもの、吸着水の影響であることが明らかとなった。3種類の異なるコーティングにて実証実験を行ったが、それらの摩擦係数の光波長依存性は、サンプル独自の特徴を有することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、摺動部に波長選択光を直接集光照射し、マクロレベルの摩擦係数の変化を大気・真空環境下で測定した例は、世界的に見て我々の知る限り無い。ナノレベルでは光のON-OFFで摩擦力が瞬時に可逆的に変化することは既に突き止めていた。本研究により、マクロレベルでも摩擦力が光照射により変化すること、また、光波長依存性があることを明らかにした。今後、表面電子励起状態の摩擦現象の研究などが進むことで、本現象の深い理解につながるであろう。当該手法で摩擦係数を大きく変化させられる光波長を決定し、それを発振するレーザー光などの照射により、将来、人為的に駆動部の摩擦力を制御することが可能となるかもしれない。

研究成果の概要(英文)：Can light change friction at the macro level? We proposed a new method for analyzing optical operand friction analysis, constructed the apparatus, and conducted the research. As a result, we found that the friction coefficient of metal oxide tribo-coatings in the macroscopic friction region was changed by light irradiation. It was also found that the change in friction coefficient depends on the optical wavelength. The friction coefficients of three different tribo-coatings were analyzed, and the optical wavelength dependence of the friction coefficients of these coatings was found to have unique characteristics.

研究分野：材料科学、物理化学

キーワード：オペランド解析 摩擦 コーティング 光照射 結晶配向性 電子励起 トライボロジー スパッタリング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

今日、エネルギー資源の枯渇、CO<sub>2</sub> 排出による地球温暖化の問題に直面しており、これら問題を解決する手段の一つとして摩擦損失削減による省エネルギー対策が期待されている。現在、我が国では、様々な工業製品における摩擦によるエネルギー損失は GDP の 3% に達すると言われ、例えば自動車においてはエンジン出力の 30% が摩擦で消費されており、その低減が望まれている。この急務となっている大幅な摩擦損失削減のためには、従来から広く行われているトライボ材料・コーティング、潤滑油の研究に加えて、パラダイムシフト的な摩擦低減方法を見出す必要性に迫られつつある。

摩擦力の本質は、二つの材料の分子間力であることが知られている。よって、根本的には何らかの方法で表面電子のバンド構造、励起状態、分極などを人為的に変化させれば、摩擦力を制御することが可能である。我々は、原子、ナノスケールにおいて、光照射による分子間力の変化で、摩擦力を制御可能であることを発見した [Appl. Phys. Exp., 10 (2017) 015201]。具体的には、原子間力顕微鏡の LFM (Lateral Force Microscopy) モードを使用し、有機分子をカンチレバー先端表面に固定したプローブを用いて真空環境下で摩擦力を測定した。このカンチレバー先端部の有機分子を光照射すると、照射時のみ摩擦力が可逆的に 1.2 倍に増大することを突き止めた。

図 1 に真空光ナノトライボロジー研究の概略を示す。この現象は、有機材料だけではなく、最近（未発表）真空環境下で無機材料であるサファイア圧子-ステンレス鋼板接触点を光照射してマクロレベルの摩擦測定を行なった結果、摩擦係数が約 70% に低減することを発見した。これらの現象は、表面電子の励起や分極など電子状態変化に伴う分子間力変化が原因と考えられるが、始まったばかりの研究のため、詳細なメカニズム解明には至っていない。ただし、光で材料間の分子間力を制御することがトライボロジー技術向上のためのブレークスルーになる可能性を示している。

### 2. 研究の目的

本研究では、光の波長・強度を変化させながら摩擦現象を解析する「光オペランド摩擦解析」手法を提案・導入し、光による材料表面電子励起・化学反応と摩擦係数の相関を系統的に実験検証し、光による摩擦ダイナミクスの学理構築を目的とする。

光オペランド摩擦解析の試みは、申請者独自の発想に基づくものであり、世界的に見ても極めて新規性が高く、本研究以外には行われていない。未だ開始されて間もない研究であることから、今後の社会的応用性については未知の部分が多いものの、全く新しい摩擦研究手法として、あるいは、新規摩擦損失削減手段としての創造性を有しているものと考えられる。当該提案研究内容の概念を図 2 に示す。光による摩擦制御が可能となれば軸受けなどへの産業応用が可能となるであろう。

### 3. 研究の方法

本研究では、光オペランド摩擦解析により、光波長、材料種、摩擦環境を変えながら、表面電子励起と摩擦係数の相関性について系統的に実験検証を行う。以下に具体的に実施する研究方法を示す。

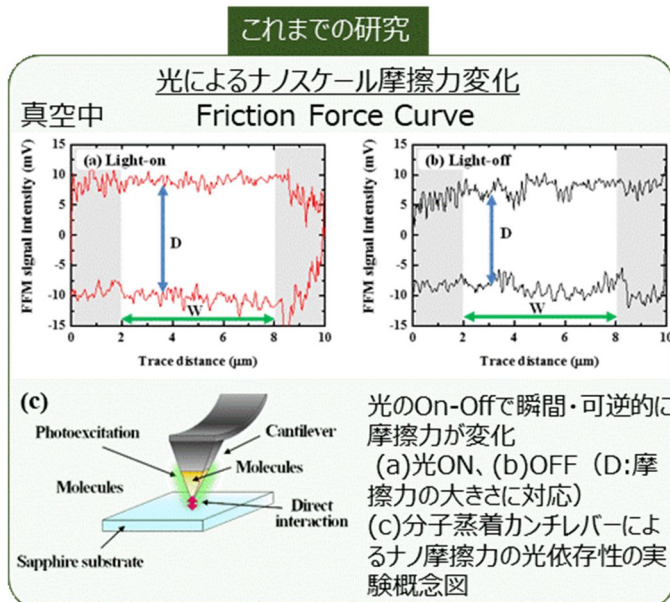


図 1 真空光ナノトライボロジー研究の概略

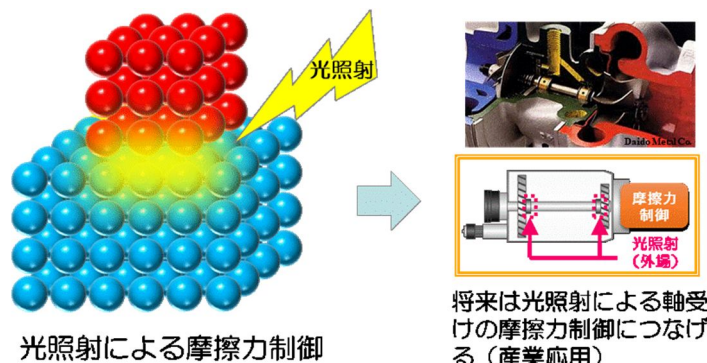


図 2 本提案研究内容の概念図

### (1) マクロレベルの光オペランド摩擦解析装置の作製

真空環境下でマクロな摩擦測定が可能な装置を基盤とし、新たに、光学定盤上に波長可変光源、および、光導入光学系を構築した。装置の概略図・写真を図3に示す。光源から発せられた光は、光路調整光学系を介して、真空摩擦測定装置の上部から真空サファイアビューポートを通して、チャンパー内に導入した。摩擦測定プローブの内部を中空にし、光を上部から貫通させている。その先端には、サファイアボール（直径3mm）を配置し、これにボールレンズと圧子との両機能を備えることで、導入された光を摺動部に集光すると共に、摩擦測定を行うことができる。光波長は、200nm～1500nmの範囲で変化させることができ、その時の光路も同一光路となるように装置を作製した。この方式が優れている点は、摺動部に確実に光を導入できることである。摺動材には、以下に述べる結晶配向を制御した各種スパッタコーティング膜を用いる。このように、当該研究プロジェクトにおいて、新規の光オペランド摩擦評価装置を設計・構築した。

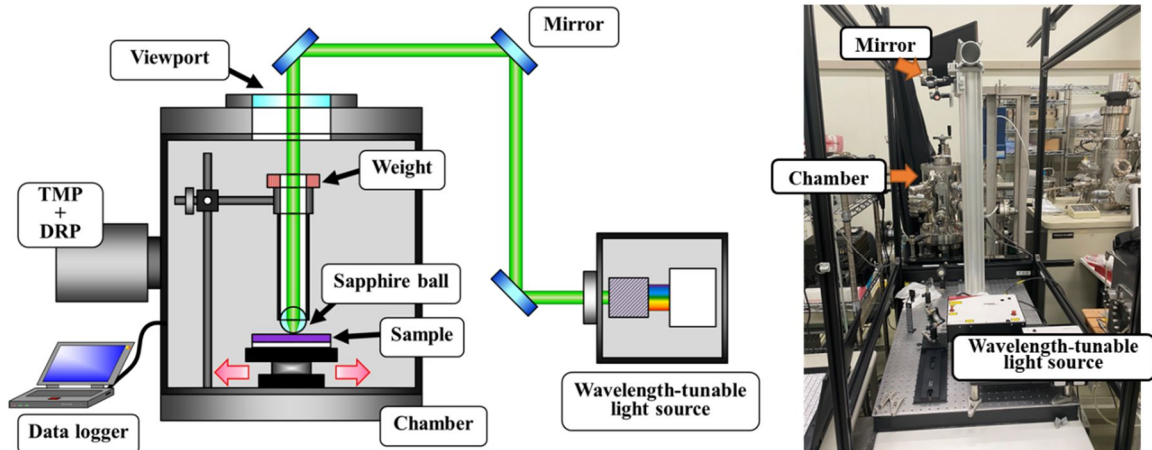


図3 光オペランドマクロ摩擦解析装置の概略図と写真

### (2) 結晶配向制御トライボコーティングの作製

全自動で結晶構造・配向性の異なる複数サンプルを作製可能な、コンビナトリアルスパッタコーティングシステムを用いて、TiO<sub>2</sub>の結晶構造・配向性を変化させながら、SUS304基板上にコーティングを作製した。サンプルは、一度に14枚導入することができ、RF電力、酸素分圧、スパッタ全圧、スパッターターゲット-サンプル間距離などの成膜条件をレシピに記入し、全自動で結晶配向性の異なるTiO<sub>2</sub>コーティングを作製した。その中で摩擦係数の低くなったものを光オペランド評価のサンプルとした。そのXRDスペクトルを図4に示す。主にルチル構造となっていることが分かった。同様の手法を用いて、SiO<sub>2</sub>、CuOコーティングを作製した。

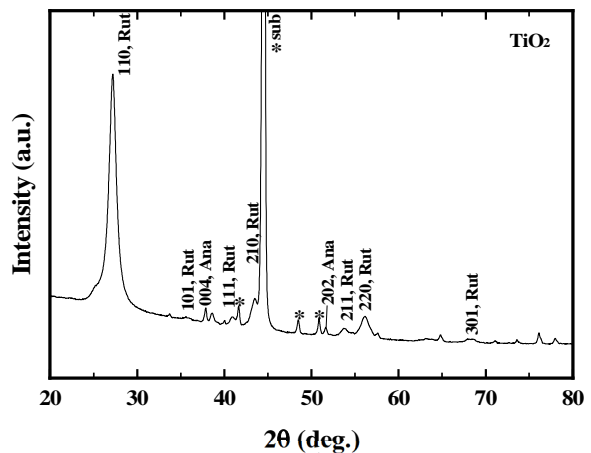


図4 TiO<sub>2</sub>コーティングのXRDスペクトル

## 4. 研究成果

前述のコーティング作製装置、および、マクロレベルの光オペランド摩擦解析装置を用いて、TiO<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>、CuOコーティングの大気・真空中における摩擦係数の光波長依存性について評価した。

### (1) TiO<sub>2</sub>コーティングの光オペランド摩擦解析

図5上に真空中におけるTiO<sub>2</sub>コーティングの光オペランド摩擦評価結果を示す。印加荷重は、0.098N、摺動距離（摩擦評価領域、始動部・停止部を除去）は、5mm、摺動速度は、10mm/min、摩擦係数は、3回測定した値の平均値とした。圧力は、 $1 \times 10^{-5}$  Paであった。圧子は、サファイアボール（直径3mm）を用い、光は、圧子を通して摺動部に集光照射し、波長を変化させながら摩擦評価を行った。摩擦評価は、各光波長変化後に毎回位置をずらして未摺動位置にて実施した。評価結果であるが、光未照射時の摩擦係数は、0.167であったが、波長200nmの光照射後には、0.148と大きく摩擦係数が低下した。300nmにおいても、0.158と摩擦係数は低下している。その他の波長領域であるが、400～700nm、および、900～1200nm範囲では、摩擦係数は、0.175近辺でほぼ一定であった。しかしながら、800nmでは、0.164まで低下することが明らかとなっ

た。これは、水の光吸収が始まる波長であることから、これが原因と思われる。TiO<sub>2</sub>の光吸収は、400nmよりも短い波長を多く吸収し、400nmよりも長い波長領域では、光吸収は少なく、波長が長くなるにつれて緩やかに吸収量が増加する。TiO<sub>2</sub>コーティングの摩擦係数変化は、400nmよりも短波長領域で大幅に摩擦係数が低下しており、光の吸収量の増大する領域と摩擦係数が減少する波長領域が良く対応することが分かった。一方、400nm以上の波長領域においても、これらの相関がみられたが、光吸収 - 摩擦係数変化は逆転し、400nmから1200nmに向けて緩やかに光吸収が増大するにつれ、摩擦係数も増大することが明らかとなった。照射光は、コーティング、および、SUS440C基板により吸収されるが、それによる熱の上昇は、光波長の100nm程度の違いでは、大きな変化は無く、わずかな光照射波長の違いにより、大きく摩擦係数が変化する領域は、摺動部の相互作用が光照射により変化したことによるものと考えられる。この要因は、1.光照射によるH<sub>2</sub>Oの分解によりTiO<sub>2</sub>コーティング表面にOH基が付着したことによるもの、および、2.コーティング表面の光励起による電子励起状態への変化による表面エネルギーの変化によるものと考えられる。いずれにせよ、マクロレベルの摩擦係数を光照射により制御することが可能であることが明らかとなった。

図5下に大気中の摩擦評価結果を示す。真空中の結果とは異なり、光照射の有無・波長変化における摩擦係数の変化は見られなかった。これは、大気環境ではコーティング表面に吸着水が存在し、前述のような摩擦低減のメカニズムが発現しないことによるものと考えられる。

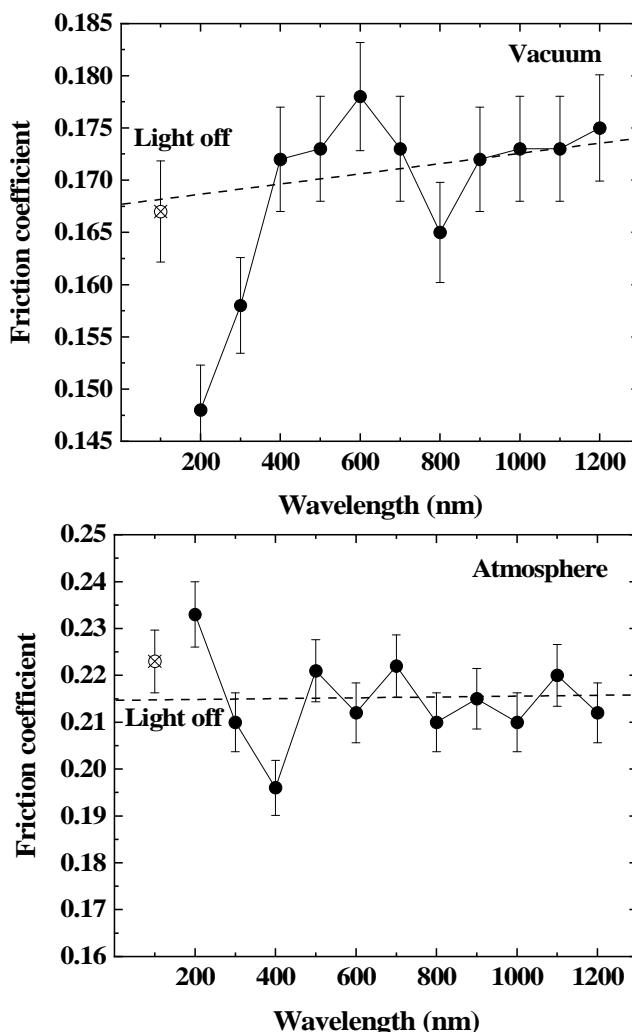


図5 TiO<sub>2</sub>コーティングの光オペランド摩擦評価結果、上：真空中での摩擦係数波長依存性、下：大気中

### (2) 結晶構造・配向性制御 SiO<sub>2</sub>コーティングの光オペランド摩擦解析

図6にSiO<sub>2</sub>コーティングの光オペランド摩擦評価結果を示す。大気中では600nm~1300nmの領域では摩擦係数が高くなる傾向が見られた。一方、真空環境下の場合、光照射により、全般的に摩擦係数が低くなる傾向が見られた。また、900nmで特異的に低くなるポイントが存在した。これも、TiO<sub>2</sub>の場合と同じく水の吸収によるものと考えられる。

### (3) 結晶構造・配向性制御 CuOコーティングの光オペランド摩擦解析

図7にCuOコーティングの光オペランド摩擦評価結果を示す。結晶配向の異なる3種類のサンプル(サンプル作製時の酸素分圧を30、60、90%に変えたもの)を用いて実験を行った。光未照射時の大気中の摩擦係数は、0.16~0.2程度であるのに対して、真空中では0.34と増大する。大気中の

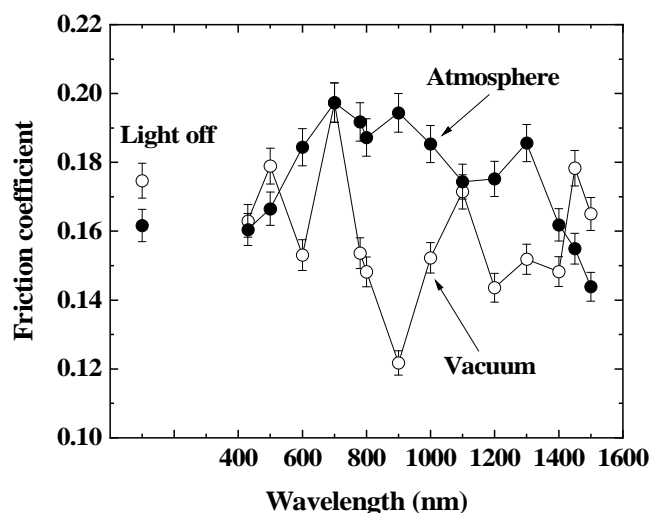


図6 SiO<sub>2</sub>コーティングの光オペランド摩擦評価結果

光照射の摩擦係数変化は興味深く、30%、60%、90%サンプルで、それぞれ、摩擦係数の増大、未変化、減少と全く異なる振る舞いを示した。これは、結晶配向性の違いによる表面エネルギーの成分の変化によるものと考えられる。真空中では30%、60%、90%サンプルに共通して、700nmで摩擦係数が増大することが分かった。800nmでは、30%、60%、90%サンプルで違いが現れ、それぞれ、大きな減少、減少、変化なし、となった。

今回の結果を総括すると、金属酸化物トライボコーティングの摩擦係数は、光の照射によりマクロな摩擦領域においても変化することが明らかとなった。新たに提案した光オペランド摩擦係数評価により、摩擦係

数変化の光波長依存性についての知見を得ることが可能となり、光照射下での摩擦メカニズムの解明につながる可能性が示された。3種類の異なるコーティングにて実証実験を行ったが、それらの摩擦係数の光波長依存性は、サンプル独自の特徴を有することが分かった。それらの主要因は、コーティングの光吸収による表面電子励起の影響、表面の化学反応によるもの、吸着水の影響、であることが明らかとなった。今後、表面電子励起状態の摩擦現象の研究などが進むことで、本現象の深い理解につながると考える。当該実験により、摩擦係数を大きく変化させられる光波長が決定されれば、レーザー光などの高強度のコヒーレント光源の照射の有無により、人為的に駆動部の摩擦力を制御することが期待でき、これが産業応用される日が来るかもしれない。

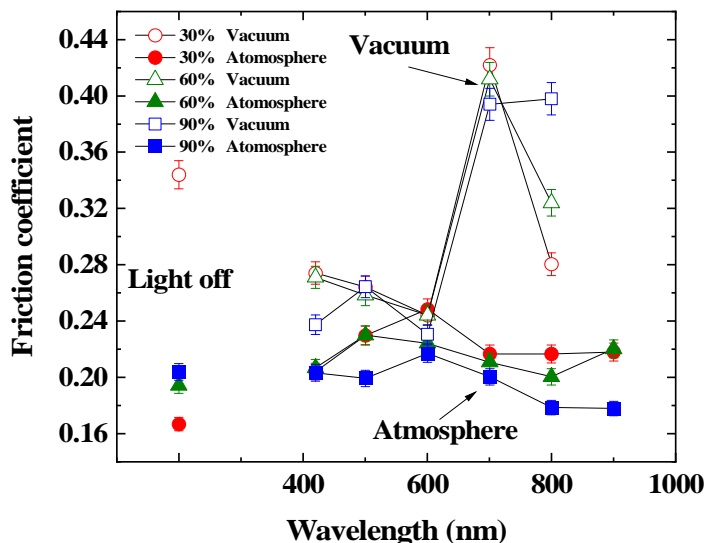


図7 CuO コーティングの光オペランド摩擦評価結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Wu Yen-Ju, Akagi Kazuto, Goto Masahiro, Xu Yibin	4. 巻 221
2. 論文標題 Topological data analysis of TEM-based structural features affecting the thermal conductivity of amorphous Ge	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 125012 ~ 125012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125012	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 Sasaki Michiko, Goto Masahiro	4. 巻 761
2. 論文標題 Development of ZnO-coated bearings with the preferred crystal orientation for micro gas turbines	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 139522 ~ 139522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsf.2022.139522	査読の有無 有
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 Sasaki Michiko, Goto Masahiro	4. 巻 40
2. 論文標題 Piezoelectric effect of crystal nanodomains on the friction force	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Vacuum Science & Technology B	6. 最初と最後の頁 052803 ~ 052803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1116/6.0001881	査読の有無 有
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 大久保勇男、後藤真宏	4. 巻 2022
2. 論文標題 Efficient material development using a combination of thin-film growth techniques and machine-learning approaches in energy applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JSAP Review	6. 最初と最後の頁 22401-1 ~ 22401-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/jsaprev.220401	査読の有無 有
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 大久保勇男、後藤真宏	4. 巻 91
2. 論文標題 機械学習を用いた高速成膜プロセスの開発とエネルギー薄膜探索	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 224 ~ 228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.91.4_224	査読の有無 有
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7件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 後藤真宏
2. 発表標題 機械学習を活用したエネルギー薄膜材料開発
3. 学会等名 令和5年度 第1回SS先端科学講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 後藤真宏
2. 発表標題 機械学習を活用したエネルギー薄膜材料開発
3. 学会等名 令和5年度 第1回SS先端科学講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 後藤真宏
2. 発表標題 機械学習を用いた高速成膜プロセスの開発とエネルギー薄膜探索
3. 学会等名 応用物理学会 JSAP Review創刊記念シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

## 〔図書〕 計1件

1. 著者名 共著、後藤真宏を含む	4. 発行年 2024年
2. 出版社 NTS	5. 総ページ数 420
3. 書名 傾斜機能材料ハンドブック	

## 〔出願〕 計5件

産業財産権の名称 セラミックス摺動部材、およびその製造方法	発明者 鷺海太郎/竹内明史/ 能川玄也/長田俊郎/ 後藤 真宏/原徹	権利者 物質・材料研究 機構、株式会社 プロテリアル
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-072185	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 セラミックス摺動部材、およびその製造方法	発明者 鷺海太郎/竹内明史/ 能川玄也/長田俊郎/ 後藤 真宏/原徹	権利者 物質・材料研究 機構、株式会社 プロテリアル
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-190368	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 熱電変換材料、熱電変換素子、及び熱電変換材料の製造方法	発明者 後藤 真宏/徐 一斌/ 諸永 拓/原 徹	権利者 国立研究開発法 人物質・材料研 究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2024-004245	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 熱電変換材料、および、それを用いた熱電変換素子	発明者 後藤 真宏/佐々木 道 子/徐一斌	権利者 物質・材料研究 機構
産業財産権の種類、番号 特許、2021-212170	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 薬剤放出器具	発明者 後藤 真宏/佐々木 道 子	権利者 物質・材料研究 機構
産業財産権の種類、番号 特許、2021-112466	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

## 〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 熱電変換材料、および、それを用いた熱電変換素子	発明者 後藤 真宏/佐々木 道 子/徐一斌	権利者 国立研究開発法 人物質・材料研 究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特許登録第7010474号	取得年 2023年	国内・外国の別 国内

## 〔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
研究 分 担 者	佐々木 道子  (Sasaki Michiko)  (50415171)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・統合型材料開発・情報基盤部門・NIMS特別研究員     (82108)	

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