

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2019～2022

課題番号：18KK0395

研究課題名（和文）AFMを用いた単一分子性ナノワイヤ・ナノシートの伝導度解析

研究課題名（英文）AFM conductivity measurements for single molecular nanowires and nanosheets

研究代表者

坂本 良太（Sakamoto, Ryota）

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：80453843

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000円

渡航期間：0.1ヶ月

研究成果の概要（和文）：種々の分子性ナノワイヤ・ナノシートを合成し、主としてこれらの伝導性を生かした応用展開（触媒・二次電池など）の追究を行った。当初、スペイン・マドリード自治大学のProf. Felix ZamoraおよびProf. Pilar Amo-Ochoaの元に滞在し共同研究を進める予定であったが、コロナ禍の影響を全面的に受けた結果、海外渡航を断念することとなった。しかしながら、ウェビナー開催・分子性ナノシートに関する共著総説執筆などを通じ、先方からの助言による分子性ナノシート・ナノワイヤに関する研究進捗改善と国際交流を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新規ナノ材料としての二次元物質「ナノシート」が文科省の平成26年度戦略目標に設定されるなど、その重要性・注目度は近年飛躍的に増大している。一次元分子性ポリマーの単一分子鎖は金属・半導体ナノ材料よりも更に微小な、究極のナノ材料となりうる。しかしながら、どちらも応用展開を示した例は存在しなかった。本研究は上記課題解決の端緒となる成果であり、学術的意義は大きく、将来的には社会・産業的意義にも通ずるものである。Prof. Felix ZamoraおよびProf. Pilar Amo-Ochoaは本研究領域の有力研究者であり、二人との関係性強化を果たしたことも意義深い。

研究成果の概要（英文）：Various molecular nanowires and nanosheets were synthesized and their applications (catalysts, rechargeable batteries, etc.) were investigated mainly by taking advantage of their conductivity. The original plan was to stay with Prof. Felix Zamora and Prof. Pilar Amo-Ochoa at the Universidad Autonoma de Madrid, Spain, for collaborative research, but the trip abroad had to be cancelled due to the full impact of the coronavirus outbreak. However, we were able to improve our research progress on molecular nanosheets and nanowires and to conduct international exchanges through webinars and co-authoring a review article on molecular nanosheets, together with the advice of the two professors.

研究分野：ナノ科学

キーワード：ナノワイヤ ナノシート 低次元物質

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。

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

新規ナノ材料としての二次元物質「ナノシート」が文科省の平成 26 年度戦略目標に設定されるなど、その重要性・注目度は近年飛躍的に増大している。現在、研究の中心はグラフェンや遷移金属ジカルコゲニドなど、層状化合物を母体とする無機ナノシートである。一方で微小構成要素（有機分子・金属イオン）から二次元ナノシート格子をボトムアップ的に直接構築する「分子性ナノシート」という物質群が存在する。国内外でここ 10 年に報告され始めた萌芽的な研究対象で、現状ではナノシート構造の構築に留まり、応用展開を示した例は存在しなかった。

機能性一次元ナノマテリアルの開発が大いに耳目を集めている。そのメインストリームである金属・半導体ナノ材料に関しては、近年単純な対称構造からヘテロ接合などの非対称構造、またはらせんに代表される特殊な幾何構造へと興味がシフトしつつある。一次元分子性ポリマーの単一分子鎖は金属・半導体ナノ材料よりも更に微小な、究極のナノ材料となりうる。加えて、ランダム・ブロック・交互共重合など、様々なヘテロ構造の構築法や、らせん構造の構築法も確立されており、高機能ナノ材料となる下地は存在する。しかしながら、ポリマー鎖 1 本 1 本の単離に課題を残し、その結果単一ワイヤ鎖のデバイス化は達成されていない。

上記背景のもと、申請者は過去 6 年間、ジピリン錯体を基盤とする一次元ナノワイヤ・二次元ナノシートに係る研究を強力に推進した¹⁻⁵。具体的には、ジピリン錯体二次元ナノシートの太陽電池への応用、単一鎖に単離可能なジピリン錯体一次元ナノワイヤの創製、ヘリカルなモチーフを有するジピリン錯体一次元ナノワイヤの創製と CPL 特性の増強、2 種の異なるジピリン架橋配位子を有する共重合ナノワイヤの構築とそのヘテロ構造の AFM 高さ情報としての可視化・ワイヤ内励起子ホッピングの新たな証明法の提案を達成した。さらには二次元金属錯体ナノシートの概念を π 共役炭素-炭素共有結合ナノシートへと拡張し、グラフィジイン (GDY) の精密合成を達成した⁶⁻⁹。GDY は炭素のみで構成される二次元物質グラフェンの同素体・類縁体であるが、 sp^2 のみならず sp 炭素を含む点に相違があり、バンドギャップと高キャリア移動度を兼ね備えた半導体材料としての応用が期待される新規ナノ材料である。

2. 研究の目的

1 項に挙げたジピリンナノワイヤ・ナノシート、および GDY はいずれも単一ナノワイヤ・ナノシートが単離可能という、希少な特性を有する分子低次元系である。本研究では、この貴重な特性を最大限活用できる追求を行う。具体的には、種々のナノワイヤ・ナノシートを合成し、その伝導度測定を特に単一ナノワイヤ・ナノシートに関して行い、これら新規ナノ材料のエレクトロニクス材料としての応用可能性を実証することを目的に設定する。加えて、ナノワイヤ・ナノシートの伝導性を生かした応用展開（触媒・二次電池など）の追求を行う。

本研究は、分子性ナノワイヤ・ナノシートという、新しい分子性ナノマテリアルの応用展開を推進するためには必要不可欠なものであり、1 項で示したように学術的意義も大きい。また、本研究は申請者単独では遂行できないものであり、スペイン・マドリード自治大学の Prof. Félix Zamora および Prof. Pilar Amo-Ochoa との国際連携のもとで研究推進を行う。

3. 研究の方法

Prof. Zamora および Prof. Amo-Ochoa は、分子低次元系の研究にて顕著な業績を収めている¹⁰⁻¹⁵。本国際共同研究に関して特に重要な研究成果として、両教授は導電性 AFM を用いた単一の金属錯体ナノワイヤの詳細な伝導度測定およびその理論的解釈を発表した¹⁵。すなわち申請者が開発する分子性ナノワイヤ・ナノシートと両教授の AFM による伝導度測定・解析技術を融合させ、これら革新的ナノ材料のエレクトロニクスへの応用可能性を追求するのが本研究課題の目的となる。分子性ナノワイヤ・ナノシートの合成に加え、種々の応用展開の追求は申請者が日本国内で行う。

4. 研究成果

(1) 海外渡航断念について

本研究課題は 2019 年 4 月から 2023 年 3 月にかけて実施された。2019 年 10 月、申請者は東京大学から京都大学へと異動した。異動前後の準備のため、2019 年度は海外渡航を行うことができなかった。その後 2020 年度から 2021 年度にかけて、コロナ禍が猛威を振るい、海外渡航に多大なる制限がかかったため、海外渡航することは叶わなかった。なお、この間 2021 年 10 月に京都大学から東北大学へと異動したことも、海外渡航を困難なものとした。2022 年度もコロナ禍の影響が残ったこと、および前年度の異動後の実験環境整備に注力する必要がある、最終的には海外渡航を断念し、国内における実験遂行、オンラインセミナー開催、共著による分子性ナノシートに関する総説執筆を行うこととした。

(2) ウェビナー開催

4-(1) 項に挙げたように、コロナ禍による訪問が困難であったことから、マドリード自治大学側とのコンタクト強化のため、ウェビナーを開催した。2021 年 1 月-2 月にかけて、International webinar series on chemical design of carbon-based catalysts と銘打ったウェビナーシリーズを企画し、そのうち 2021 年 1 月 27 日に Prof. Zamora に講演頂いた (Processability of imine-based covalent organic frameworks and potential applications, 図 1)。内容は共有結合ナノシートの積層体である共有結合有機構造体 (COFs) の加工性と応用展開に関するもので

あり、本研究課題遂行においても非常に重要な知見が得られた。

(3) 分子性ナノシートに関する共著総説

ウェビナーを含めたオンラインディスカッションを進める中、総説を共著として執筆する提案を行ったところ、Prof. Zamora および Prof. Amo-Ochoa に快諾いただいた。1年弱をかけ執筆を進め、Coordination Chemistry Reviews 誌に Layered metal-organic frameworks and metal-organic nanosheets as functional materials のタイトルにて発表した¹⁶。その内容は、金属錯体ナノシート及びその積層体に集中し、特にその機能と応用展開にフィーチャーしたものである。

(4) その他総説

GDY を中心とする分子由来の炭素材料に関する総説を執筆した¹⁷⁻¹⁹。

(5) クリックナノシート

図 2a に示す共有結合ナノシート的一种、クリックナノシート NF1 は申請者が 2017 年に初めて発表したナノシートであるが²⁰、そのドメインサイズはわずか 50 μm であった。本研究では界面合成法を改良 (図 2b)、具体的には tris(benzyltriazolylmethyl)amine (TBTA) を添加することでナノシートの成長が促進され、例えば直径 12 cm の大面積 NF1 を欠陥なしでガラス基板に貼付できることを見出した (図 2c)。原子間力顕微鏡 (AFM) 測定により、その厚みは 90 nm 程度であり、大きなアスペクト比を実現した²¹。

(6) テルピリジン金属錯体ナノシート

申請者はこれまでに金属イオンとして鉄および亜鉛を採用したテルピリジン金属錯体ナノシートを報告したが^{22,23}、香港理工大学の Wai-Yeung Wong 教授との共同研究として、テルピリジンコバルトナノシートのエレクトロクロミック挙動を追究した (図 3a)²⁴。本ナノシートは酸化に対して可逆的な応答を示し、L1 を用いたナノシートは $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$ に、L2 を用いたナノシートは L2 中のトリアリールアミンの一電子酸化に帰属されるレドックス反応を示し、電解質溶液中にて色変化として観察された (図 3b, c)。さらに L1 を用いたナノシートを固体化エレクトロクロミックデバイスに組み込み (図 3d)、電圧を印加したところ、電解質溶液中と同様の色変化が観察された (図 3e)。すなわち電子ペーパーなどへの応用展開が可能な材料である。

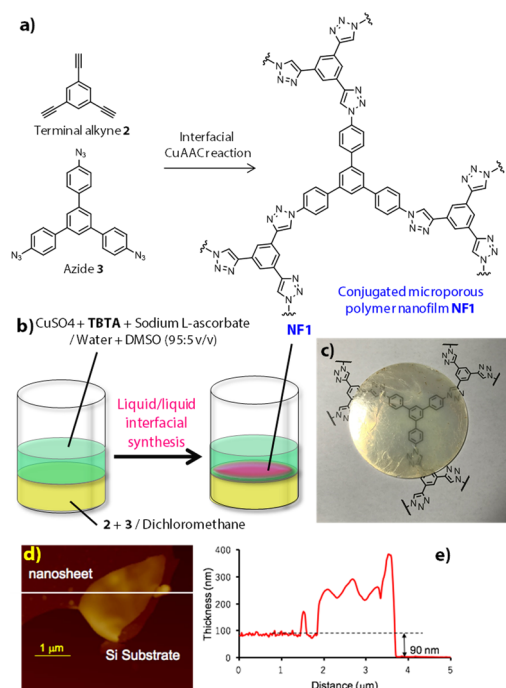


図 2 (a) クリックナノシート NF1 の合成と構造. (b) 液液界面法. (c) 大面積 NF1 (直径 12 cm) をガラス基板に貼付したもの. (d, e) NF1 の AFM 像と白線部高さプロファイル.

図 1 ウェビナーのフライヤー (抜粋).

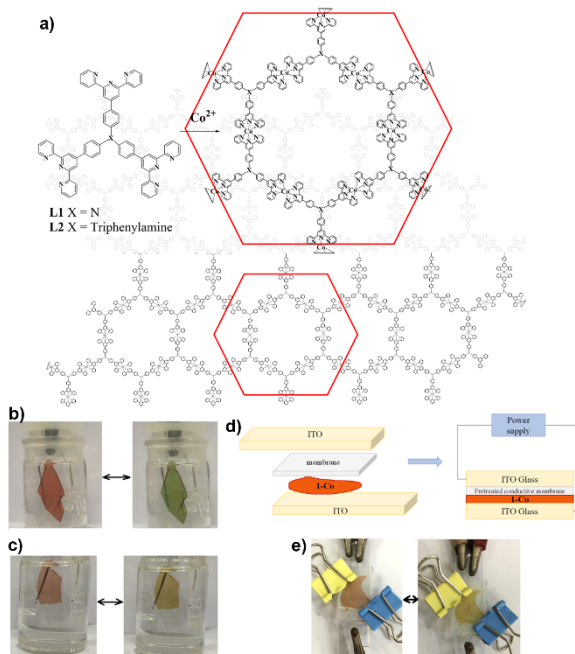


図 3 (a) テルピリジンコバルトナノシートの構造. (b, c) ITO 電極に担持した、L1 および L2 を用いたコバルトナノシートの電気化学的色変化. (d) 固体化エレクトロクロミックデバイスの構造. (e) L1 を用いたナノシートのエレクトロクロミックデバイス色変化.

(7) ジチオレン金属錯体ナノシート

申請者が開発したジチオレンナノシートおよびその類縁体は、一般的な分子性ナノシートや有機-金属構造体 (MOF) とは異なり高導電性を示す。また、HER の電極触媒能を有することも見出されている。研究期間内にはその類縁体の合成を報告したが²⁵、新しい展開として、水分解光触媒の HER 助触媒としての応用を追究した²⁶。近年、化石資源に依存しない再生可能なエネルギーの開発及び利用が求められており、クリーンな水素製造法の1つとして、半導体光触媒を用いた水分解が注目されている。光触媒の活性を向上させる戦略として、助触媒の担持が最も一般的でかつ有効な手段として採用され、特に水素発生反応 (HER) 助触媒は多くの光触媒で必須となる。HER 助触媒としては金属や金属酸化物が採用されるが、

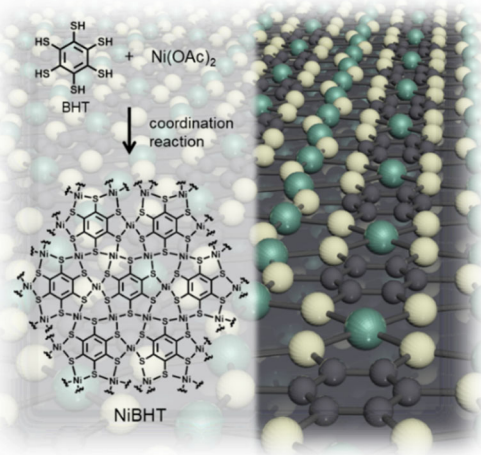


図4 NiBHTの構造。

反応選択性を欠くことからその利用は制限を受ける。例えば Pt は HER に対して高い活性を有するものの、水の再生反応及び酸素還元反応も同時に触媒するため、水完全分解系には不適である。分子性金属錯体は中心金属や配位子を変更することで触媒活性をチューニングできるため、助触媒としての応用も期待されるものの耐久性に欠け、水の全分解への応用例は皆無である。

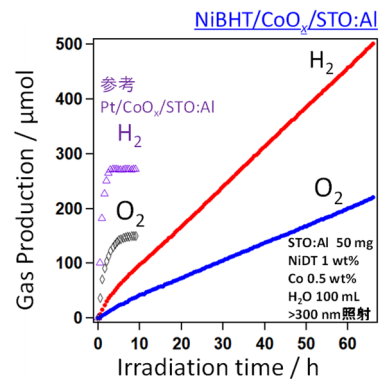


図5 NiBHT および Pt を HER 助触媒とする CoO_x/SrTiO₃ による水の光完全分解。

本研究では反応選択性と耐久性の両立を狙い、金属錯体ナノシートの HER 助触媒としての利用を追究した。ジチオレンナノシート一種である NiBHT (図4) を HER 助触媒として採用し、代表的な光触媒である CoO_x/SrTiO₃ との複合系の追究を行った。複合系に紫外光を照射したところ、定常的な水の完全分解を示した。対照的に Pt を助触媒とした系では、H₂ と O₂ の蓄積に伴い正味の分解反応が停止した (図5)。NiBHT は光触媒上における HER を加速する一方、発生した水素と酸素からの水逆生成反応、および酸素還元反応を抑制することで定常的な水分解を実現することを実験および理論の両面から明らかとした。

(8) ジチオレン金属錯体ナノコロイド

前項で述べたジチオレンナノシートと光触媒の複合体の調製は、シートサンプルをボールミルで破碎後に光触媒と混合することで行っている。破碎後でも NiBHT は数 μm 程度の粒子径を持ち、数百 nm 程度の光触媒とサイズスケールが適合しない。そこで HER 触媒活性の向上と担持量低下に向けて助触媒の化学的微細化に取り組んだ。手法としては NiBHT 合成時にキャップ配位子 1,2-benzenedithiol を加えることで配位ナノシートが無限構造に成長するのを抑止した。試薬混合後、溶液は黒色に変化し錯形成の進行が示唆された。得られた反応液 (NiBHT-NC) に対して、動的光散乱法による粒子径評価を行った。図6に示すように、反応直後の生成物は粒子径 130 nm 程度のナノコロイドであることが分かり、目的のとおり助触媒の微細化に成功した。このナノコロイドは時間とともに凝集していき、6時間後には 500 nm を超える粒子となった。この粒子径の時間発展の間、ナノコロイドのゼータ電位は -55 mV 程度で変化は見られなかった (図7)。これらの知見を今後の光触媒との複合体形成に役立てる。なお、Prof. Zamora および Prof. Amo-Ochoa とのオンラインディスカッションにて、DLS によるナノワイヤ・ナノシートの分散状態の同定が必要との意見を受け、本研究の研究費にて装置導入を行った。

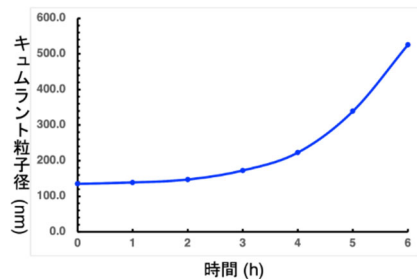


図6 NiBHT-NC の粒子径の経時変化。

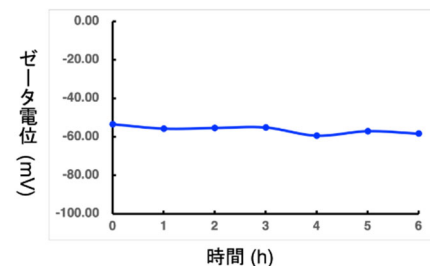


図7 NiBHT-NC ゼータ電位の経時変化。

(9) 導電性 MOF のリチウムイオン電池カソード活物質としての応用展開

キノイドベースの三次元 MOF, Fe₂(dhbq)₃ の合成に成功した。Fe₂(dhbq)₃ は Fe³⁺ と dhbq からなる 3 重に相互貫入した中性の三次元多孔性フレームワークを形成しており、Fe の d 軌道と dhbq の p 軌道からなる d-π 共役により、高い電気伝導度 $1.2 \times 10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ (E_a = 212 meV) を有する。Fe₂(dhbq)₃ をリチウムイオン電池のカソード材料として用いたところ、既存の MOF カソードを用いたリチウムイオン電池で最大の初回放電容量 322 mAh/g を示した (図8)²⁷。

(10) データマイニングを用いた XANES 分析による金属錯体の構造推定法の開発

エクソ線吸収端近傍構造 (XANES) スペクトルは、金属イオンの酸化数や配位環境を反映し、非結晶性試料でも測定できるため、アモルファスや薄膜、溶液などでも金属種の構造推定が可能な優れた測定手法である。しかし、特に配位構造に関

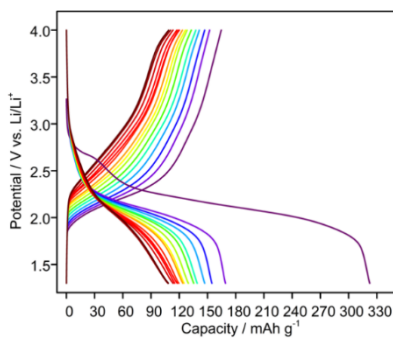


図 8 Fe₂(dhbc)₃ をカソードとしたリチウムイオン電池の充放電特性。

する特徴量をスペクトルから抽出するのは容易ではなく、専門家による熟練が必要とされている。申請者は、機械学習の一種であるデータマイニングの手法を用いて XANES スペクトルから金属錯体の構造を推定する手法を開発した。結晶構造が明らかな 44 種類の Ni 錯体の XANES スペクトルについて、クラスタリング及び多次元尺度構成法 (MDS) により分析を行い、Ni 錯体の配位数及び配位元素によって明確にグループ分けできることを明らかにした (図 10a)。次に、実際に [Ni(OH₂)₆]²⁺ 錯体の水溶液にエチレンジアミンを徐々に滴下し、[Ni(en)₃]²⁺ 錯体へと配位子交換する過程の XANES スペクトル分析したところ、O6 配位錯体のグループから脂肪族 N6 配位錯体のグループへと変化する過程を MDS により可視化することに成功した (図 10b)。この結果は、今後の NiBHT の触媒反応過程の構造推定などに適用することが期待される²⁸。

(11) ジヒドロインドロカルバゾール誘導体を用いた交互積層型電荷移動錯体の開発

導電性を示す電荷移動錯体の新たな構成分子として、生物活性を持ち、p 型有機半導体としても知られるジヒドロインドロカルバゾール (ICZ) 骨格に着目し、これをドナー分子として種々のアクセプター分子と組み合わせることで、新規な交互積層型電荷移動錯体を開発した。N-メチル化された ICZ 誘導体である ICZ-Me を合成し、TCNQ, TCNE, クロラニルと 1:1 で複合化させることで、3 種類の結晶を合成し、その構造を X 線回折実験により明らかにした (図 11)。(ICZ-Me)(TCNQ)、(ICZ-Me)(chloranil) は水素結合の影響により分子軌道の重なりが小さい分子配置となったが、(ICZ-Me)(TCNE) は大きな分子軌道の重なりを生じ、電荷移動度はおよそ 0.65 と大きく、直流電気伝導率も他の 2 つの電荷移動錯体比べて 5 倍程度高いことを明らかにした²⁹。

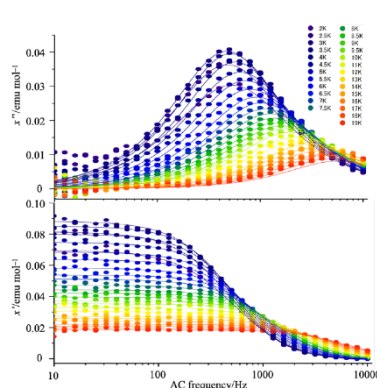


図 9 (CoCp*)₂(BTI-xy) の 10000 Oe 磁場下における交流磁化率の周波数依存性。

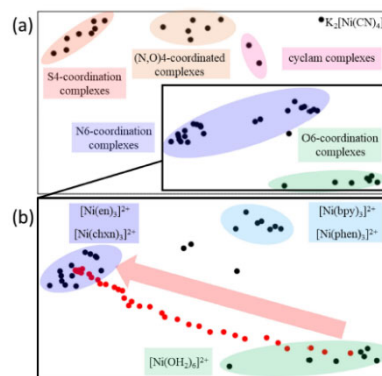


図 10 (a) MDS による可視化マップ。配位数や配位原子が異なるグループで色分けされている。(b) (a)の一部拡大図。溶液中での配位子交換反応過程の可視化 (赤)。

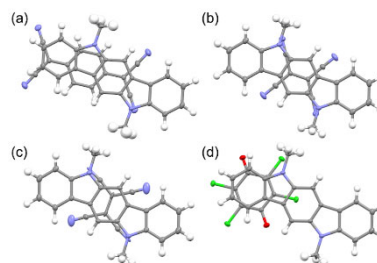


図 11 合成した電荷移動錯体の結晶構造 (a) (ICZ-Me)(TCNQ)、(b, c) (ICZ-Me)(TCNE)、(d) (ICZ-Me)(chloranil)。

<引用文献>

- [1] *Angew. Chem. Int. Ed.* **2017**, *56*, 3526. [2] *Chem. Sci.* **2015**, *6*, 2853. [3] *Nature Commun.* **2015**, *6*, 6713. [4] *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 16024. [5] *Sci. Adv.* **2019**, *5*, eaau0637. [6] *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 3145. [7] *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, *11*, 2730. [8] *J. Mater. Chem. A* **2018**, *6*, 22189. [9] *Phys. Rev. Mater.* **2018**, *2*, 054204. [10] *Angew. Chem. Int. Ed.* **2017**, *56*, 987. [11] *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *29*, 10079. [12] *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*, 14345. [13] *Nat. Commun.* **2013**, *4*, 1709. [14] *Nat. Nanotech.* **2010**, *5*, 110. [15] *Adv. Mater.* **2018**, *30*, 1705645. [16] *Coord. Chem. Rev.* **2022**, *472*, 214787. [17] *Coord. Chem. Rev.* **2022**, *466*, 214577. [18] *Chem. Sci.* **2020**, *11*, 5866-5873. [19] *Adv. Mater.* **2019**, *31*, 1804211. [20] *Chem. Eur. J.* **2017**, *23*, 8443. [21] *Chem. Commun.* **2020**, *56*, 3677. [22] *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 5359. [23] *J. Am. Chem. Soc.* **2015**, *137*, 4681. [24] *J. Mater. Chem. C* **2019**, *7*, 9159. [25] *Chem. Sci.* **2019**, *10*, 5218. [26] *ACS Catal.* **2022**, *12*, 3881. [27] *Inorg. Chem.* **2023**, *62*, 6306. [28] *Chem. Lett.* **2023**, *52*, 289. [29] *Chem. Lett.* DOI: 10.1246/cl.230175.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Guan Jingyan, Pal Tigmansu, Kamiya Kazuhide, Fukui Naoya, Maeda Hiroaki, Sato Tetsu, Suzuki Hajime, Tomita Osamu, Nishihara Hiroshi, Abe Ryu, Sakamoto Ryota	4. 巻 12
2. 論文標題 Two-Dimensional Metal-Organic Framework Acts as a Hydrogen Evolution Cocatalyst for Overall Photocatalytic Water Splitting	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 3881 ~ 3889
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.1c05889	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 Wu Kuo-Hui, Sakamoto Ryota, Maeda Hiroaki, Phua Eunice Jia Han, Nishihara Hiroshi	4. 巻 26
2. 論文標題 Ultralong -Conjugated Bis(terpyridine)metal Polymer Wires Covalently Bound to a Carbon Electrode: Fast Redox Conduction and Redox Diode Characteristics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Molecules	6. 最初と最後の頁 4267 ~ 4267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/molecules26144267	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 坂本良太, 仁科勇太, 神谷和秀, 西原洋知, 生越友樹	4. 巻 77
2. 論文標題 新しい物質群「3Dカーボン構造体」の創成	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 化学	6. 最初と最後の頁 29-33.
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 Fa Shixin, Yamamoto Masanori, Nishihara Hiroto, Sakamoto Ryota, Kamiya Kazuhide, Nishina Yuta, Ogoshi Tomoki	4. 巻 11
2. 論文標題 Carbon-rich materials with three-dimensional ordering at the angstrom level	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 5866 ~ 5873
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0SC02422H	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 Liu Yurong, Sakamoto Ryota, Ho Cheuk-Lam, Nishihara Hiroshi, Wong Wai-Yeung	4. 巻 7
2. 論文標題 Electrochromic triphenylamine-based cobalt(II) complex nanosheets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 9159 ~ 9166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9TC02257K	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 該当する

1. 著者名 Pal Tigmansu, Doi Shotaro, Maeda Hiroaki, Wada Keisuke, Tan Choon Meng, Fukui Naoya, Sakamoto Ryota, Tsuneyuki Shinji, Sasaki Sono, Nishihara Hiroshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Interfacial transmetallation synthesis of a platinadithiolene nanosheet as a potential 2D topological insulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 5218 ~ 5225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9SC01144G	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 Sakamoto Ryota, Fukui Naoya, Maeda Hiroaki, Matsuoka Ryota, Toyoda Ryojun, Nishihara Hiroshi	4. 巻 31
2. 論文標題 The Accelerating World of Graphdiynes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 1804211 ~ 1804211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.201804211	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 Komeda Joe, Shiotsuki Ryo, Rapakousiou Amalia, Sakamoto Ryota, Toyoda Ryojun, Iwase Kazuyuki, Tsuji Masaki, Kamiya Kazuhide, Nishihara Hiroshi	4. 巻 56
2. 論文標題 'Click' conjugated porous polymer nanofilm with a large domain size created by a liquid/liquid interfacial protocol	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 3677 ~ 3680
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CC00360C	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 該当する

1. 著者名 Gupta Shraddha, Tanaka Haruki, Fuku Kentaro, Uchida Kaiji, Iguchi Hiroaki, Sakamoto Ryota, Kobayashi Hiroaki, Gambe Yoshiyuki, Honma Itaru, Hirai Yutaka, Hayami Shinya, Takaishi Shinya	4. 巻 62
2. 論文標題 Quinoid-Based Three-Dimensional Metal-Organic Framework Fe ₂ (dhbq) ₃ : Porosity, Electrical Conductivity, and Solid-State Redox Properties	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 6306 ~ 6313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.2c04313	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 Sakamoto Ryota, Fukui Naoya, Maeda Hiroaki, Toyoda Ryojun, Takaishi Shinya, Tanabe Tappei, Komeda Joe, Amo-Ochoa Pilar, Zamora Felix, Nishihara Hiroshi	4. 巻 472
2. 論文標題 Layered metal-organic frameworks and metal-organic nanosheets as functional materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Coordination Chemistry Reviews	6. 最初と最後の頁 214787 ~ 214787
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ccr.2022.214787	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 該当する

1. 著者名 Sakamoto Ryota, Toyoda Ryojun, Jingyan Guan, Nishina Yuta, Kamiya Kazuhide, Nishihara Hirotomo, Ogoshi Tomoki	4. 巻 466
2. 論文標題 Coordination chemistry for innovative carbon-related materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Coordination Chemistry Reviews	6. 最初と最後の頁 214577 ~ 214577
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ccr.2022.214577	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 坂本 良太、西原 寛	4. 巻 68
2. 論文標題 高分子重合により合成可能な2次元カーボン：グラフィジン	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 高分子	6. 最初と最後の頁 303-304
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 坂本 良太、西原 寛	4. 巻 72
2. 論文標題 分子性ナノシートの新展開	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 化学と工業	6. 最初と最後の頁 344-346
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 Chiba Yuta, Tanabe Tappei, Koyama Shohei, Yamanaka Shuntaro, Takaishi Shinya, Sakamoto Ryota, Iguchi Hiroaki	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Structure and Physical Properties of Alternately Stacked Donor-Acceptor Complexes with 5,11-Dimethyl-5,11-dihydroindolo[3,2-b]carbazole	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.230175	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 Fuku Kentaro, Yoshida Takefumi, Sato Tetsu, Iguchi Hiroaki, Takaishi Shinya, Sakamoto Ryota, Abe Hitoshi	4. 巻 52
2. 論文標題 Data Mining from XANES Spectra of Nickel Complexes for Structure Estimation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 289 ~ 291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.230028	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 Koyama Shohei, Sato Kazunobu, Yamashita Masahiro, Sakamoto Ryota, Iguchi Hiroaki	4. 巻 25
2. 論文標題 Observation of slow magnetic relaxation phenomena in spatially isolated \cdot -radical ions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 5459 ~ 5467
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2CP06026D	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1件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 坂本 良太
2. 発表標題 分子性ナノシート・ナノワイヤの新展開
3. 学会等名 第245 回有機エレクトロニクス材料研究会 「トポロジカル絶縁体」（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 柚原淳司、他	4. 発行年 2020年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 448
3. 書名 ポストグラフェン材料の創製と用途開発最前線：二次元ナノシートの物性評価、構造解析、合成、成膜プロセス技術、応用展開	

1. 著者名 吾郷 浩樹、齋藤理一郎、他	4. 発行年 2020年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 558
3. 書名 グラフェンから広がる二次元物質の新技术と応用	

1. 著者名 W.-Y. Wong and Q. Dong, 他	4. 発行年 2022年
2. 出版社 WILEY-VCH	5. 総ページ数 560
3. 書名 Functional Nanomaterials. Synthesis, Properties and Applications	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 水素生成助触媒、光触媒、水素の製造方法、水素の製造装置、及び半導体材料	発明者 坂本 良太、阿部 竜、鈴木 肇、 Jingyan Guan	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2022/024714	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	サモラ フェリックス (Zamora Felix)	マドリード自治大学・理学部・教授	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	アモ・オチョア ピラー (Amo-Ochoa Pilar)	マドリード自治大学・理学部・教授	

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			
スペイン	Universidad Autonoma de Madrid			
中国	香港理工大学			