

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02547

研究課題名(和文)新規ナノカーボン材料「グラフィジイン」の精密合成とその半導体特性の解明

研究課題名(英文) Precise synthesis of novel nanocarbon "graphdiyne" and elucidation of its semiconductor property

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) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：有機分子・金属イオンからナノシート格子を構築する「分子性ナノシート」という物質群が存在するが、国内外でここ10年ようやくその構築が報告され始めた萌芽的な研究対象である。分子性ナノシートが日本社会・産業に破壊的イノベーションをもたらす上の解決すべき問題点として、現状、分子性ナノシートの合理的な機能創出と応用展開の欠如がある。本研究では、分子性ナノシート類のリチウムイオン電池活物質としての利用、光触媒への応用など、基礎・応用両面で重要な成果を挙げた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では分子性ナノシートの様々な応用展開を提案することに成功した。二次元物質は革新的なナノ材料として、大きな期待を集めている。例えば、グラフェンは次世代のエレクトロニクスを担う電子材料として世界各国の電機メーカーも研究に参入しており、基礎研究レベルを超えた熾烈な開発競争が繰り広げられている。魅力的な物性を有しナノ材料として機能する「分子性ナノシート」を提案できれば産業界から注目を集めることは想像に難くない。

研究成果の概要(英文)：Molecular nanosheets" are a group of materials that construct nanosheet lattices from organic molecules and metal ions, and are a budding research subject that has only begun to be reported in Japan and abroad in the past decade. The problem that needs to be solved in order for molecular nanosheets to bring disruptive innovation to Japanese society and industry is the current lack of rational creation of functions and application of molecular nanosheets. In this study, we have achieved important results in terms of both fundamentals and applications, such as the use of molecular nanosheets as active materials for lithium-ion batteries and photocatalysts.

研究分野：合成化学

キーワード：分子性ナノシート 炭素材料 触媒

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

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。現状ナノシートの研究は結晶性層状化合物を母体とする無機ナノシートに偏っている。例えば二次元カーボン物質であるグラフェンには大きな期待が寄せられ、既にヘッドフォンやテニスラケットなどの素材として既に上市されている。しかしながら、グラフェンの特性を最も活かした応用展開であるエレクトロニクス素材としての応用は道半ばである。単層グラフェンの問題点として、バンドギャップがゼロであるため、エレクトロニクスに不可欠な半導体として機能しない点が挙げられる。

無機ナノシートとは対照的に、微小構成要素(有機分子・金属イオン)からナノシート格子を直接構築する「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。申請者はこの7年間、金属イオンとヘテロ元素間の配位結合を利用した金属錯体ナノシート構築に注力してきた。その結果、魅力的な物性を有しナノ材料として機能する分子ナノシートの創製に世界に先駆けて成功し、分子性ナノシートの研究分野を牽引してきた。

2. 研究の目的

本研究では、炭素-炭素共有結合に基づく π 共役分子ナノシートのうち、グラフィジイン(GDY)およびその類縁体に着目する。図1にその合成スキームと構造を示した。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る。また、GDYはヘキサエチニルベンゼン(HEB)をモノマーとし、その酸化的多量化によって合成可能な分子ナノシートでもある。理論計算によると、単層GDYはバンドギャップと高いキャリア移動度を兼ね備えた半導体として振る舞うことが予測されている。グラフェンの電子材料としての問題点はゼロバンドギャップによる半導体性の欠如にあり、すなわち単層GDYはグラフェンを凌駕する魅力的な二次元ナノマテリアル候補である。しかしながら、未だ高品質の単層GDYの合成と半導体特性評価は実現されていない。

そこで本研究では、次項に示す申請者独自のGDYに関する研究成果を更に発展させることで単層GDYナノシートを実現し、その優れた半導体特性を実証することを目的に設定する。加えてモノマーの自在設計によるGDY誘導体の合成とその単層化・半導体特性評価を行う。さらに、その他の分子性ナノシートについても基礎・応用の両面から追究を行う。これらの達成により、GDYおよびその誘導体の新規ナノ材料としての地位を確立し、これら新しい二次元マテリアルのエレクトロニクス分野への応用展開の扉を開く。

3. 研究の方法

詳細については4項にて各個、言及する。

4. 研究成果

(1) 導電性MOFのリチウムイオン電池への応用

Metal-Organic Frameworks (MOFs)は、金属イオンと多座配位子リガンドで構成される多孔質結晶性高分子であり、広範な表面積とサイズ制御可能な細孔を持ち、ガス貯蔵、分離、触媒反応、化学センシングなど多岐にわたる応用が期待されている。しかし、従来のMOFは絶縁体で酸化還元非活性な性質を持つものが多く、それがMOFの電子デバイス等への応用を限定していた。最近の研究では、酸化還元活性を持つMOFが電子伝導性を高める上で有用であることが示されており、本研究では酸化還元活性なビルディングユニットを用いたMOFターゲットとした。本研究では、酸化還元活性な配位子として、2,5-ジヒドロキシ-1,4-ベンゾキノン(dhbq)を研究対象とし、同配位子を用いた新規電気伝導性MOFを開発することを目的とした。この配位子は金属イオンにbis-bidentate様にキレート配位できる上、ベンゼノイド構造とキノイド構造を2電子酸化還元を伴って相互変換可能である。また、金属イオンには、同じく酸化還元活性な鉄イオンを用いた、 Fe^{2+} イオンを含む水溶液とdhbq配位子を還元剤を含む水溶液中で混合し、ガラス容器の蓋を開けた状態で静置した。空気中の酸素によって徐々に酸化が進むことで、新規MOFである $Fe_2(dhbq)_3$ の良質な単結晶を得た(図1)。このMOFの構造および物性を単結晶X線構造解析、電気伝導度測定、磁化率測定、拡散反射スペクトル測定、X線吸収スペクトル、固体サイクリックボルタンメトリー測定によって明らかにした。また、本MOFをカソードとしてリチウムイオン電池の充放電特性を評価した。新しい3次元MOFである $[Fe_2(dhbq)_3]$ は、非常に高い導電性を示した($1.2 \times 10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$, 図2)。この原因は、Feイオンのd電子とdhbq配位子の π 電子からなる長距離d- π 共役によると考えられる。また、リチウムイオン電池のカソード材料として用いた際に、322 mAh/gという極めて高い初回放電容量を達成した(図3)。この値は、金属あるいはリガンドのみに基づく酸化還元反応では説明することが出来ず、金属(1電子)とリガンド(2電子)の両者の酸化還元反応が容量に寄与していることを示唆する結果であった¹。

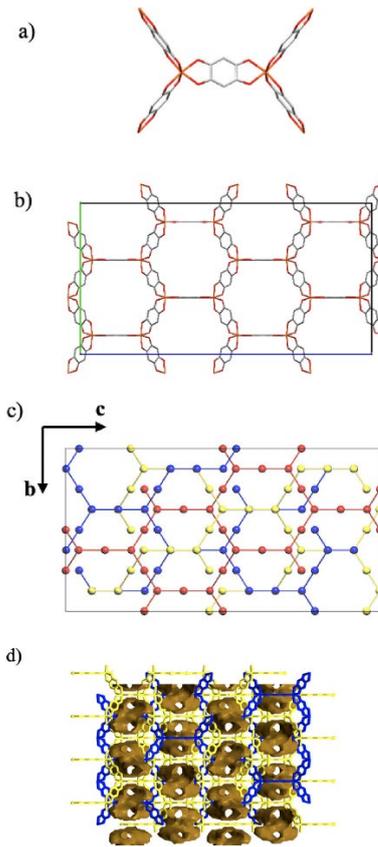


図 1. (a) [Fe₂(dhbq)₃]の結晶構造の一部. 2つの dhbq²⁻に架橋された Fe^{III} 中心の局所環境. (b) 結晶学的な a 軸に沿って見たときの, 三つの相互貫通層のうちの一つの結晶構造. オレンジ = Fe、赤 = O、灰色 = C. (c) 三つの独立したネットの模式図. (d) a 軸に沿った 1 次元の孔チャンネル.

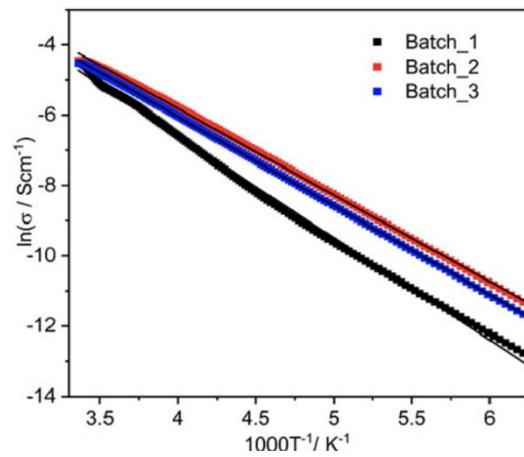


図 2 [Fe₂(dhbq)₃]の電気伝導率の温度依存性.

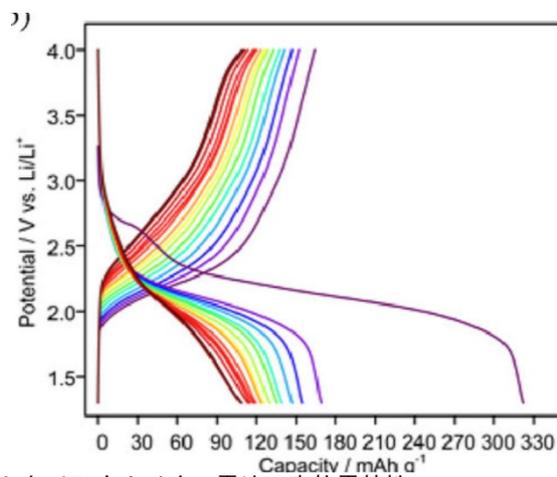


図 3 [Fe₂(dhbq)₃]をカソードとしたリチウムイオン電池の充放電特性.

(2) 分子性ナノシートを H₂ 発生助触媒とする高効率水分解半導体光触媒系の構築

筆者が開発した導電性分子性ナノシートの一種である NiBHT (図4) を HER 助触媒として採用し、代表的な光触媒である酸化コバルト修飾 Al ドープチタン酸ストロンチウム (CoO_x/STO:Al) との複合系の追究を行った (NiBHT/CoO_x/STO:Al). 用いた NiBHT は液液界面合成法により合成した. NiBHT をビーズミルにより剥離・破碎をしたが, そのドメインサイズは SrTiO₃:Al に比べ大きく (図5), 両者の複合化には課題が残った. にもかかわらず, 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水分解反応が停止した (図6). NiBHT/CoO_x/STO:Al の量子収率は 6.5%

(@350 nm) と算出され, 卑金属系助触媒としては高い値を示した. 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².

しかし, NiBHT/CoO_x/STO:Al における NiBHT (以下 NiBHT-Bulk と称する) のドメインサイズは大きく, 合理的な光触媒への担持は達成されていない (図7a). そこで NiBHT シート方向における成長を抑制し, 微粒子化させるために, NiBHT の合成時にモジュレータ配位子として機能するベンゼン-1,2-ジチオール (BDT) の添加を試みた (NiBHT ナノ粒子, NiBHT-NP と称する, 図7b). BDT はベンゼンヘキサチオール (BHT) と競合しながら Ni イオンに配位することで, または NiBHT ドメイン末端に BDT が結合することで, ドメインサイズ縮小が期待される. さらに BHT は NiBHT ドメイン内部にも取り込まれると考えられ, 電子構造・HER 活性に影響を与えられ

る. AFM では NiBHT-NP の形状として, 直径 10 nm 程度のナノ粒子が観測された (図8a). ただし, SEM 像では粒子の凝集が観察されるなど (図8b), ハンドリングには注意を要する. 図8c には NiBHT-NP と CoO_x/STO:Al との複合体 (NiBHT-NP/CoO_x/STO:Al) の STEM 像を示した. および AFM により形態観察された. 10 nm サイズの NiBHT-NP が, 200 nm サイズの STO:Al に担持される様子が確認された. すなわち NiBHT-Bulk (図5) に比べ, HER 助触媒の担持状態が大幅に改善された. NiBHT-NP/CoO_x/STO:Al も紫外光照射により, 安定的な水の完全分解を達成した (図8d). 水の完全分解活性に対する NiBHT-NP の最適担持量は 0.25 wt% であり, NiBHT-Bulk の最適担持量 (3 wt%) の 1/10 以下の値となった. これは担持の最適化によるものと帰属される. 365 nm 照射に対する量子収率は 10.3% (@365 nm) であった. 担持量の減少による光遮蔽の低減に加え, NiBHT ドメイン内部に取り込まれた BDT が触媒活性点となり得ることが, 理論計算により示唆された³.

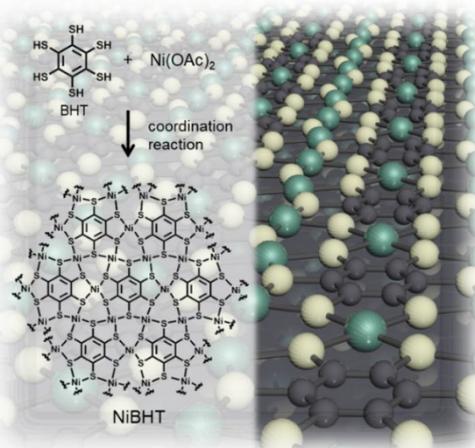


図4. NiBHT の構造.

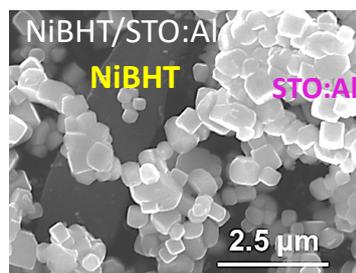


図5. NiBHT と STO:Al との複合体 (NiBHT/STO:Al) の SEM 像

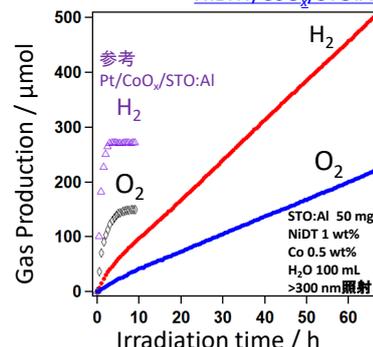


図6. NiBHT および Pt を HER 助触媒とする CoO_x/SrTiO₃ による水の光完全分解.

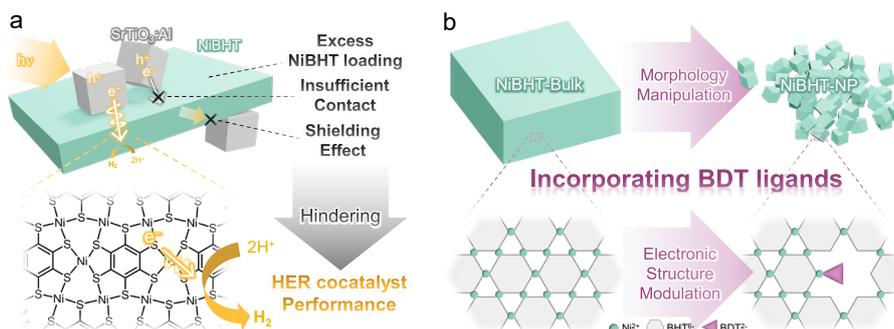


図7. (a) NiBHT-Bulk と (b) NiBHT-NP.

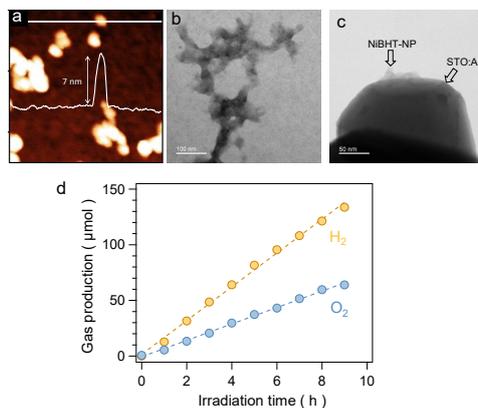


図 8. (a) NiBHT-NP の AFM 像. (b) NiBHT-NP の SEM 像. (c) NiBHT-NP/CoO_x/STO:Al の STEM 像.

(3) BHT の精製と結晶構造決定

本項は当初予定しておらず、研究を進める中で着想を得た。BHT は代表的な導電性金属錯体ナノシートの代表的な配位子であるが、化学的に不安定であり、その単結晶は報告されていなかった。筆者は BHT の単結晶 X 線構造解析を用いた構造決定に成功した (図 9-1)。BHT の不安定性は酸化剤または塩基によって増幅されるが、不安定性によりどのような化学種が生成するのか明らかとはなっていない。本項では BHT の塩基処理/酸化体であるジスルフィド体の構造決定にも成功した (図 9-2 および 4)。BHT の結合長などの知見を得たことに加え、BHT の精製が可能であることを意味しており、本項における知見は高品質の金属錯体ナノシート合成に繋がると期待される⁴。

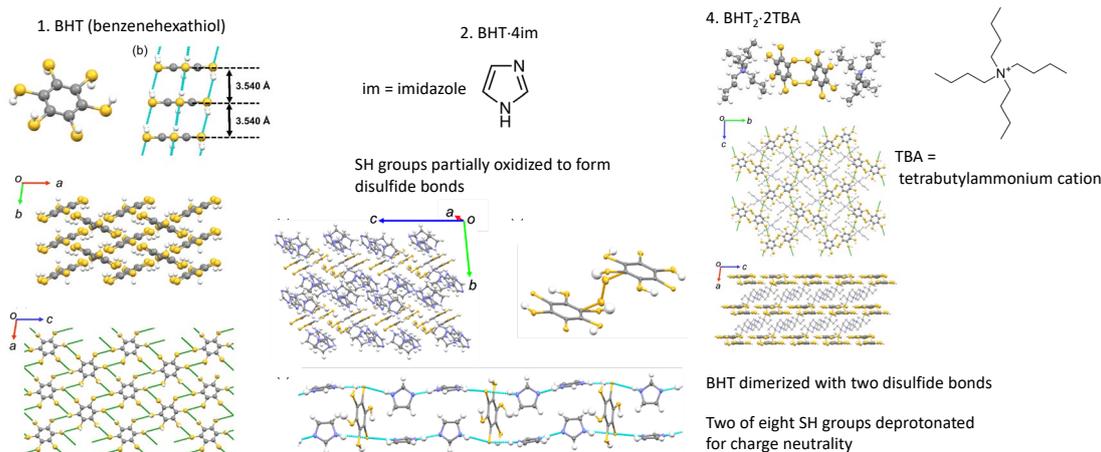


図 9. BHT, およびその塩基処理/酸化体の結晶構造.

(4) 炭素材料の組成・化学構造分析技術の開発

エネルギー関連用途に使用される先進的な炭素材料には、ヘテロ原子として窒素が含まれることが多く、これが物理的・化学的・電子的特性に大きく影響する可能性がある。しかし、従来の分析技術では、窒素に関する組成および構造情報の取得は限定的であった。東北大学の西原・吉井らは、記録的な高感度でバルク窒素ドープ炭素材料の化学種を分析する包括的なツールとして、最高 2100°C まで到達する昇温脱離 (TPD) 技術を開発し、10 ppm レベルで窒素種のバルク定量を達成した。申請者は GDY 誘導体として合成したテトラ (4-エチルフェニル) ポルフィリンを窒素ドープ炭素の出発原料として提供し、固相熱重合を経た炭素化を行い、TPD 分析質として提供した⁵。

<引用文献>

[1] *Inorg. Chem.* **2023**, *62*, 6306. [2] *ACS Catal.* **2022**, *12*, 3881. [3] *ACS Catal.* **2024**, *14*, 1146. [4] *Inorg. Chem.* **2023**, *62*, 11731. [5] *Chem* **2024**, doi: 10.1016/j.chempr.2024.03.029.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Yoshii Takeharu, Nishikawa Ginga, Prasad Viki Kumar, Shimizu Shunsuke, Kawaguchi Ryo, Tang Rui, Chida Koki, Sato Nobuhiro, Sakamoto Ryota, Takatani Kouhei, Moreno-Rodriguez Daniel, Skorna Peter, Scholtzova Eva, Szilagy Robert Karoly, Nishihara Hirotomo	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Quantitative and qualitative analysis of nitrogen species in carbon at the ppm level	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Chem	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) 10.1016/j.chempr.2024.03.029	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 Guan Jingyan, Koizumi Kazuma, Fukui Naoya, Suzuki Hajime, Murayama Kantaro, Toyoda Ryojun, Maeda Hiroaki, Kamiya Kazuhide, Ohashi Keitaro, Takaishi Shinya, Tomita Osamu, Saeki Akinori, Nishihara Hiroshi, Kageyama Hiroshi, Abe Ryu, Sakamoto Ryota	4. 巻 14
2. 論文標題 Manipulating the Morphology and Electronic State of a Two-Dimensional Coordination Polymer as a Hydrogen Evolution Cocatalyst Enhances Photocatalytic Overall Water Splitting	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 1146 ~ 1156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.3c04389	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 Chiba Yuta, Tanabe Tappei, Koizumi Kazuma, Toyoda Ryojun, Iguchi Hiroaki, Takaishi Shinya, Sakamoto Ryota	4. 巻 62
2. 論文標題 Single-Crystal Structures of Benzenehexathiol and Its Disulfide Forms	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 11731 ~ 11736
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.3c01734	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 Chiba Yuta, Tanabe Tappei, Koyama Shohei, Yamanaka Shuntaro, Takaishi Shinya, Sakamoto Ryota, Iguchi Hiroaki	4. 巻 52
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 488 ~ 491
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 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 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 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 Ogawa Kanta, Sakamoto Ryota, Zhong Chengchao, Suzuki Hajime, Kato Kosaku, Tomita Osamu, Nakashima Kouichi, Yamakata Akira, Tachikawa Takashi, Saeki Akinori, Kageyama Hiroshi, Abe Ryu	4. 巻 13
2. 論文標題 Manipulation of charge carrier flow in Bi ₄ Nb ₈ Cl nanoplate photocatalyst with metal loading	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 3118 ~ 3128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1sc06054f	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 Ogawa Kanta, Suzuki Hajime, Zhong Chengchao, Sakamoto Ryota, Tomita Osamu, Saeki Akinori, Kageyama Hiroshi, Abe Ryu	4. 巻 143
2. 論文標題 Layered Perovskite Oxyiodide with Narrow Band Gap and Long Lifetime Carriers for Water Splitting Photocatalysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 8446 ~ 8453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.1c02763	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 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 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 Hiroto, 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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 2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

1. 発表者名 Ryota Sakamoto
2. 発表標題 Two-Dimensional Metal-Organic Framework Acts as a Hydrogen Evolution Cocatalyst for Overall Photocatalytic Water Splitting
3. 学会等名 9th Asian Conference on Coordination Chemistry (ACCC9) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ryota Sakamoto
2. 発表標題 Bottom-up Molecular Nanowires and Nanosheets
3. 学会等名 19th Korea-Japan Joint Symposium in Inorganic Chemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本 良太
2. 発表標題 二次元PCPs/MOFs/COFsの新展開
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂本 良太
2. 発表標題 分子低次元物質の新展開
3. 学会等名 CEMS Topical Meeting Online— 超分子ポリマーの進化形 — (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 坂本 良太 (袖原 淳司 監修)	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	

1. 著者名 Hiroaki Maeda, Michihiro Nishikawa, Ryota Sakamoto, Hiroshi Nishihara	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 61
3. 書名 Comprehensive Inorganic Chemistry III Third Edition Chapter: Inorganic Photochemistry	

1. 著者名 Ryota Sakamoto (Eds. W.-Y. Wong and Q. Dong)	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	

〔産業財産権〕

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			