

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18974

研究課題名(和文)速度論支配下で働く配位自己集合の原理の解明

研究課題名(英文)Revealing principles of coordination self-assembly working under kinetic control

研究代表者

平岡 秀一(Hiraoka, Shuichi)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：10322538

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、金属イオン(M)と多座配位子(L)からなるMnLm自己集合系について、速度論支配における自己集合の原理の解明を行なった。可逆な反応ネットワークの数理モデルを構築し、Lに対してMを滴定するシミュレーションを実施したところ、選択的にMxLx+1鎖状中間体を経て安定性の高いM4L4環状集合体を与え、その収率は平衡状態を超えることが明らかになった。また、この結果はMnLm系で実験的に検証された。続いて、M6L4切頂四面体の自己集合系を実験および理論により調べた結果、4員環を経て生成物へ至り、この経路選択が反応ネットワーク内のある素反応が不可逆に振る舞うことに由来することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的に可逆反応は熱力学支配により化学平衡へ至る。このような場合、反応の帰結は反応経路に依存しない。本研究では各素反応が可逆であっても、これらが連結した反応ネットワークを構築すると、速度論の影響を受けることが明らかとなり、その原理の一端が解き明かされたことで、自然界に見られる速度論支配による自己集合の意義やその理解といった基礎学理への寄与に加えて、本研究で明らかになった原理に基づく新たな物質合成の新手法の開発へ繋がること期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated the principle of kinetically controlled self-assembly for the MnLm self-assembly systems consisting of a metal ion (M) and a multidentate ligand (L). A mathematical model of the reversible reaction network was constructed, and numerical simulations of titrating M against L were performed, which gave highly stable M4L4 cyclic assembly via selective formation of MxLx+1 chain intermediates, resulting in higher yields than those in the equilibrium state. This result was also verified experimentally in the MnLm system. Next, experimental and theoretical investigations of the self-assembled system of the M6L4 truncated tetrahedron revealed that the M6L4 assembly was formed through a four-membered ring intermediate and that this pathway was selected because of the emergence of irreversibility in certain elementary reactions in the reaction network.

研究分野：超分子化学・分子自己集合

キーワード：分子自己集合 速度論支配 自己集合経路 反応ネットワーク 準安定状態

1. 研究開始当初の背景

分子自己集合やタンパク質の折れ畳みは、可逆な素反応によって構成されている。一般的に可逆反応は熱力学平衡状態に到達するため、化学反応の帰結は自由エネルギー差に依存し、生成物の分布が決定する(ボルツマン分布)。自由エネルギーのような状態関数は経路に依存しないことを踏まえれば、このような可逆反応の帰結は経路に依存しない。一方で、上記の分子自己集合やタンパク質では、速度論トラップと呼ばれる準安定状態を生成することがある。これまで速度論トラップに対する理解は、このような準安定状態の高い速度論的安定性に基づく理解に限られていた。分子自己集合やタンパク質の折れ畳み現象は、エネルギー地形として表現することが多い。また、各素反応を繋いだ化学反応ネットワークとして表現することもできる。反応ネットワークは、代謝や神経ネットワークなど、生命系の機能発現に関わり、各素反応単独では現れない機能を発現することから、ネットワークの理解に関する多くの研究が行われてきた。これら多くのネットワークの素反応は不可逆であるが、可逆な素反応のみからなる化学反応ネットワークについては、上述のとおり化学平衡に至ることを踏まえると、その帰結が経路に依存しないため、可逆な反応ネットワークの振る舞いは軽視されてきた。

2. 研究の目的

可逆な反応ネットワークを不可逆な反応ネットワークと比較すると、可逆なネットワークでは各素反応はどちらの方向にも進行しうるため、どちらに進行するのか?という自由度も存在し、またこの方向性が周囲の素反応との相互作用によって決まるとするならば、可逆な反応ネットワークの振る舞いは複雑であると考えられる。また、準安定種が可逆な反応ネットワークで生成する場合、多くは熱力学安定種とともに副生する。もし、可逆な反応ネットワークの中で、速度論トラップを導く経路が選択されるなら、速度論トラップのみを生成することも可能となり、自然界における速度論トラップの形成の理解を深めるのみならず、物質合成としても、これまでの熱力学支配における反応で得られる熱力学安定種を超えて、準安定な集合体などを選択的に得る戦略の確立へつながる。

そこで本研究では、可逆な反応ネットワークにおける振る舞いを実験および理論により明らかにすることを目的とし、その対象として遷移金属イオン(M)と多座配位子(L)からなる自己集合性錯体を人工系のモデル系として利用し、その原理の解明を行った。

3. 研究の方法

本研究は、実験および理論を組み合わせることで実行した。上述の通り、分子自己集合は、可逆な素反応からなる化学反応ネットワークとして捉えることができる。本研究で取り扱う自己集合性錯体の場合、MとLの間に形成される配位結合の交換(配位子交換)が素反応である。

先行研究によって、自己集合性錯体の形成過程を実験および理論によって解明する手法としてQASAP(Quantitative Analysis of Self-Assembly Process)とNASAP(Numerical Analysis of Self-Assembly Process)を開発した。QASAPでは、自己集合の始状態と終状態における全成分の時間変化を実験的に定量することで、全中間体の中に含まれる構成要素の時間発展を得ることができる。自己集合性錯体における中間体を構成する成分は、金属イオン(M)、多座配位子(L)に加え、脱離配位子(X)が含まれるため、中間体は一般式として

$M_aL_bX_c$ と記述できる。全中間体の平均組成を $[M_{(a)}L_{(b)}X_{(c)}]_t$ と表し、 $\langle a \rangle_t$, $\langle b \rangle_t$, $\langle c \rangle_t$ から導かれるパラメータ $\langle n \rangle_t$, $\langle k \rangle_t$ を基に自己集合過程を議論することができる。QASAP で得られる $\langle n \rangle_t$, $\langle k \rangle_t$ のみでは、自己集合経路を議論するほど詳細な形成過程を理解できないため、QASAP のデータをより詳細に解析するために NASAP を利用する。NASAP では、当該の自己集合系で想定される全ての中間体とこれらを結ぶ素反応を列挙した反応ネットワークを構築し、各素反応をタイプ分類し、それぞれに反応速度定数を割り当て、これらの速度定数のデータセットを変数として、QASAP で得られた始状態と終状態の存在率および $\langle n \rangle_t$, $\langle k \rangle_t$ の時間変化が反応ネットワークモデルから求めたものと一致する速度定数のデータセットを求める。このようにして求められた速度定数のデータセットをもとに、反応ネットワーク内における数値シミュレーションを行うことで、全ての中間体の時間変化を知ることができ、これをもとに自己集合の主要経路や律速段階を明らかにすることができる。

本研究では、可逆な反応ネットワークにおける準安定状態の形成のモデル系を Curtin-Hammett 原理から出発することで構築し、その振る舞いを調べた。続いて、 M_6L_4 切頂四面体の自己集合過程について、その部分環構造として三角形と四角形が存在することに着目し、自己集合過程において三角形と四角形のどちらを経て進行するのかという問題を経路選択におけるモデル系として解析し、これらの環形成における経路選択における速度論的な寄与を調べた。

4. 研究成果

4.1 Curtin-Hammett 原理の拡張としての可逆なネットワーク内における過渡的速度論状態の発現

Curtin-Hammett 原理は速い可逆反応の両端に不可逆反応を接続した 3 つの素反応からなる系である。この系では、2 つの不可逆反応が存在するため、本研究が対象とする可逆な反応ネットワークではないが、Curtin-Hammett 原理では、反応の帰結が速い平衡反応における主成分に由来する不可逆過程が優先するとは限らず、生成物は可逆反応に接続された不可逆過程の影響を受けるというものであり、可逆系を含む速度論支配という観点で類似性がある。

そこで、Curtin-Hammett 系の不可逆過程を可逆過程として数値シミュレーションを実行した結果、反応の初期には、Curtin-Hammett 原理から予測される生成物の分布に近い状態が得られ、その後、最終的には系は熱力学平衡状態から予測される生成物の分布に到達した。この結果は、素反応が全て可逆であっても、反応初期には Curtin-Hammett 的な振る舞いをするのであり、速度論的要素が発現することを示している。また、この速度論的な状態（過渡的速度論状態）は本シミュレーションでは 40 分ほど維持された。そこで、この 3 つの可逆な素反応系の両端に同じ可逆系を接続した 5 つの可逆な素反応からなる直列の反応ネットワークへ拡張し、数値シミュレーションを実行した結果、過渡的速度論状態の寿命が 1.4 日まで延びることが明らかとなった。この事実から、より複雑な可逆な反応ネットワークでは、過渡的速度論状態の寿命がさらに長くなり、温和な条件では、ほぼ永久的に熱力学平衡に到達しないこともあり得ることを示唆している。また、この時得られた過渡的速度論状態は、速度論トラップの 1 つと言えるが、通常考えられている速度論トラップのように、準安定種に関する素反応の活性化エネルギーが高いことに由来するというよりは、経路選択の帰結として、複数の素反応を介して深いエネルギーの井戸に落ち込んでいるとイメージできる。5 つの直列の可逆系ですら、このような速度論状態を生み出すことができ

たことは、より複雑な反応ネットワークでは、さらに速度論の影響を受けた反応の振る舞いが期待でき、準安定状態が生成することが多いにあり得ると言える。

4.2 反応ネットワーク内における準不可逆性の発現による経路選択

続いて、 M_6L_4 切頂四面体における自己集合過程を QASAP および NASAP により解析した。上述の通り、 M_6L_4 錯体は部分三角形構造と部分四角形構造が存在する。そのため、自己集合経路を環形成の観点から分類すると、三角形→四角形→三角形と四角形→三角形→三角形の 2 つの経路が存在する。三角形や四角形の原料である鎖構造も自己集合で形成する。ここで、三角形の原料となる M_3L_3X に注目すると、これが環化することで、三角形を形成する場合と、さらにオリゴマーが成長し、四角形も形成しうる鎖状中間体 M_4L_4X を与える反応の 2 つが存在する。ここで、前者の環化反応は分子内反応で後者は分子間反応である。一般的に、低濃度では分子内反応の方が速度論的に優先され、本実験条件において簡単な計算を行うと、三角形の形成が有利になることがわかった。しかしながら、実際に QASAP と NASAP の解析を行うと、 M_6L_4 切頂四面体の主要形成経路は、四角形形成から開始することが明らかになった。続いて、この予想外の反応経路の発現の起源を明らかにするために、各素反応について反応の流れの時間変化を調べた。その結果、反応初期段階では、三角形の形成が優先することがわかった。しかしながら、1 時間ほど経過すると、生成した三角形の一部が開環し、オリゴマー形成を経て四角形を形成し、 M_6L_4 切頂四面体を与える経路に変化することが明らかになった。このような、反応の進行方向の逆転はまさに可逆な反応ネットワーク内でのみ起こる特異な現象である。また、このような進行方向の逆転現象の発現は、これに接続するいくつかの素反応がほぼ不可逆に振る舞うことに由来することがわかった。興味深いことに、この不可逆性を発現する素反応と同じ速度定数が割り当てられた別の素反応について調べると、不可逆性は見られなかった。この結果は、可逆反応ネットワーク内のある素反応が不可逆に振る舞う理由は、その素反応の速度定数で決定されているわけではなく、周囲に存在する素反応との相互作用の帰結として発現していることを示している。言い換えると、可逆な反応ネットワーク内の振る舞いは、これを構成する素反応の相互作用に基づく非線形的現象によることが明らかになった。

以上のように、可逆な反応ネットワークは、全ての素反応が可逆であっても、化学平衡に到達するとは限らないことが明らかになり、速度論の要素が存在することが明らかとなった。また、このようにして生成する準安定状態は、その速度論安定性だけでなく、これを与える経路選択によって達成されていることが示された。したがって、経路選択を完璧にコントロールすることができれば、準安定な集合体を定量的に生成することも可能となり、熱力学支配では不可能な集合体を得られ、分子自己集合に基づく物質合成の可能性がさらに広がることを示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Zhang Xinman, Takahashi Satoshi, Aratsu Keisuke, Kikuchi Isamu, Sato Hirofumi, Hiraoka Shuichi	4. 巻 24
2. 論文標題 Cyclization or bridging: which occurs faster is the key to the self-assembly mechanism of Pd6L3 coordination prisms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 2997 ~ 3006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CP04448F	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 Abe Tsukasa, Horiuchi Shinnosuke, Hiraoka Shuichi	4. 巻 58
2. 論文標題 Kinetically controlled narcissistic self-sorting of Pd()-linked self-assemblies from structurally similar tritopic ligands	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 10829 ~ 10832
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2cc04496j	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 Tateishi Tomoki, Takahashi Satoshi, Kikuchi Isamu, Aratsu Keisuke, Sato Hirofumi, Hiraoka Shuichi	4. 巻 60
2. 論文標題 Unexpected Self-Assembly Pathway to a Pd(II) Coordination Square-Based Pyramid and Its Preferential Formation beyond the Boltzmann Distribution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 16678 ~ 16685
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.1c02570	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 Zhan Yi-Yang, Hiraoka Shuichi	4. 巻 94
2. 論文標題 Molecular "Hozo": Thermally Stable Yet Conformationally Flexible Self-Assemblies Driven by Tight Molecular Meshing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 2329 ~ 2341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20210228	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36件(うち招待講演 2件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 高橋 聡, 佐藤 啓文, 平岡 秀一
2. 発表標題 配位自己集合における反応経路選択の一般原理の理論
3. 学会等名 第24回理論化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部司・平岡秀一
2. 発表標題 速度論支配による多成分かご形Pd(II)配位自己集合体の経路選択形成
3. 学会等名 第19回ホストゲスト・超分子シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 真田直樹・阿部司・岡澤厚・平岡秀一
2. 発表標題 全6タイプのヘテロPd ₂ L ₄ かご形錯体の速度論自己集合
3. 学会等名 第19回ホストゲスト・超分子シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuichi Hiraoka
2. 発表標題 PRINCIPLES OF KINETICALLY CONTROLLED Pd(II)- BASED COORDINATION SELF-ASSEMBLY
3. 学会等名 44th International Conference on Coordination Chemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平岡 秀一
2. 発表標題 配位自己集合における経路選択の原理
3. 学会等名 第32回基礎有機化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 真田直樹・阿部司・岡澤厚・平岡秀一
2. 発表標題 経路選択による6種類の多成分Pd ₂ L ₄ かご形錯体の速度論自己集合
3. 学会等名 第32回基礎有機化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋聡, 佐藤啓文, 平岡秀一
2. 発表標題 速度論支配における配位自己集合の反応経路選択の理論
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsushi OKAZAWA, Naoki SANADA, Satoshi TAKAHASHI, Shuichi HIRAOKA
2. 発表標題 Kinetically controlled selective self-assembly of Rh ₂ -based molecular triangle and square by proper choice of leaving ligand
3. 学会等名 錯体化学会第72回討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部司・高橋聡・平岡秀一
2. 発表標題 Narcissistic self-sorting of Pd(II)-linked self-assemblies from structurally similar tritopic ligands depending on pathway and leaving ligand
3. 学会等名 錯体化学会第72回討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinnosuke Horiuchi, Eri Sakuda, Yasuhiro Arikawa, Shuichi Hiraoka, Keisuke Umakoshi
2. 発表標題 Symmetry-Breaking Assembly via Induced-fit Molecular Recognition in a Hydrogen-bonded Supramolecular System
3. 学会等名 錯体化学会第72回討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 真田 直樹・阿部 司・岡澤 厚・平岡秀一
2. 発表標題 6種類の多成分系Pd ₂ L ₄ かご形錯体の速度論支配による選択的自己集合
3. 学会等名 第12回CSJ化学フェスタ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀内 新之介、作田 絵里、有川 康弘、平岡 秀一、馬越 啓介
2. 発表標題 錯体内包型超分子の分子非対称化と光機能変化
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 真田 直樹・岡澤 厚・高橋聡・平岡秀一
2. 発表標題 Rh二核ユニットからなる四角形錯体の自己集合における脱離配位子と溶媒効果
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹内 啓介、真田 直樹、阿部 司、平岡 秀一
2. 発表標題 三種類の二座配位子からなる準安定Pd4L8かご形錯体の速度論自己集合
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阿部 司・平岡秀一
2. 発表標題 エネルギーラチェット機構に基づく準安定なPd4L8インターロックかご形錯体の形成
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jingwei Lu, Satoshi Takahashi, Tsukasa Abe, Shuichi Hiraoka
2. 発表標題 Self-assembly processes of imine-based [2+2] rings and [3+2] cages through imine exchanges
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yutong Zhang, Tsukasa Abe, Shuichi Hiraoka
2. 発表標題 Pd4L8 interlocked cage with halogen ions bound in its cavities
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Chenlian Wan, Tomoki Tateishi, Tsukasa Abe, Shuichi Hiraoka
2. 発表標題 Kinetic template effect on the self-assembly process of Pd2L4 cage consisting of ditopic pyridyl ligands with a 1,3-phenylene spacer
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋 聡、阿部 司、立石 友紀、佐藤 啓文、平岡 秀一
2. 発表標題 NO3-イオンによるPd6L4正方ピラミッド錯体の自己集合経路のスイッチング
3. 学会等名 日本化学会 第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋 聡、立石 友紀、菊池 勇、新津 敬介、佐藤 啓文、平岡 秀一
2. 発表標題 Pd6L4正方ピラミッド錯体形成の意外な自己集合経路
3. 学会等名 第23回理論化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 立石 友紀・高橋 聡・菊池 勇・新津 敬介・佐藤 啓文・平岡 秀一
2. 発表標題 Pd6L4四角錐の自己集合過程および速度論支配下 における生成物変換
3. 学会等名 第18回ホストゲスト・超分子化学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 真田直樹・松尾秀明・岡澤 厚・平岡秀一
2. 発表標題 多成分Pd(II)二核かご形錯体を速度論支配で形成する一般手法の開発
3. 学会等名 錯体化学会第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 立石 友紀・高橋 聡・菊池 勇・新津 敬介・佐藤 啓文・平岡 秀一
2. 発表標題 Unexpected Self-Assembly Pathway to a Pd6L4 Square-Based Pyramid and Its Biased Formation under Kinetic Control
3. 学会等名 錯体化学会第71回討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 陳 弘燁・村田 萌・立川 仁典・平岡 秀一
2. 発表標題 歯車状両親媒性分子の非対称化による水溶性箱形自己集合体への分子包接の加速
3. 学会等名 第31回基礎有機化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 立石友紀・高橋聡・菊池勇・新津敬介・佐藤啓文・平岡秀一
2. 発表標題 自己集合経路に基づくPd6L4四角錐の速度論的優先生成
3. 学会等名 第31回基礎有機化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋聡、佐藤 啓文、平岡 秀一
2. 発表標題 化学反応ネットワークに基づくPd(II)錯体の自己集合経路解析
3. 学会等名 第15回分子科学討論会2021札幌
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 真田直樹・松尾秀明・岡澤 厚・平岡秀一
2. 発表標題 速度論支配に基づく多成分Pd(II)二核かご形錯体の選択的形成法の開発
3. 学会等名 第11回CSJ化学フェスタ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 陳 弘輝・村田 萌・小林 理・島崎 智実・立川 仁典・平岡 秀一
2. 発表標題 歯車状両親媒性分子からなる高い応答性を示す水溶性箱形カプセルの開発
3. 学会等名 第11回CSJ化学フェスタ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平岡秀一
2. 発表標題 噛み合わせて分子カプセル
3. 学会等名 高分子学会21-2超分子研究会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平岡秀一・真田直樹・高橋 聡・立石友紀・菊地 勇
2. 発表標題 Kinetically Controlled Coordination Self-assembly: Approaches to Pathway Selection
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡澤 厚、高橋 聡、平岡 秀一
2. 発表標題 Paddle-wheel型ロジウム(II)二核錯体をコーナー素子とする超分子四角形の自己集合過程
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部 司、平岡秀一
2. 発表標題 Effect of tritopic ligands on the formation mechanism of self-assembled Pd6L4 complexes
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾 秀明、平岡 秀一
2. 発表標題 二種類の二座配位子から構成される準安定trans-Pd ₂ L ₄ かご形錯体の速度論自己集合
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 真田直樹、岡澤 厚、平岡秀一
2. 発表標題 速度論支配による多成分 Pd(II)かご形錯体の段階的自己集合
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 陳 弘樺、平岡 秀一
2. 発表標題 Development of water-soluble molecular capsules with fast inclusion and high response assembled from gear-shaped amphiphiles
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 聡、佐藤 啓文、平岡 秀一
2. 発表標題 Numerical study for kinetic control of coordination self-assembly: M ₄ L ₄ square complex as an example
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔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
研究 分担 者	高橋 聡 (TAKAHASHI Satoshi) (20456180)	東京大学・大学院総合文化研究科・助教 (12601)	

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
---------	---------