

令和 3 年 6 月 6 日現在

機関番号：12604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04884

研究課題名(和文) 二次元無機ナノ凝集体による機能性空間の創成

研究課題名(英文) Development of functional open spaces in two-dimensional inorganic nanoagglomerates

研究代表者

佐藤 公法 (SATO, Kiminori)

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：00401448

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)：本研究では、二次元無機ナノ凝集体の二次元構造に起因する特異な局所構造に着目し、優れた化学的活性性を有する新規機能性ナノ空間の創成を目指した。ナノシートが凝集すると、部分的なオーバーラップのため、内部にナノシートエッジのような活性サイトを有するオンゲストロームスケール空間が生成されることがわかった。このようなナノ空間中に導入されたガス状CO₂分子のほとんどが四重極相互作用により物理吸着することがわかった。CO₂分子はエッジサイトに弱く結合した酸素をピックアップすることにより活性化し、ナノ空間内表面に安定に固定されることも判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粘土鉱物とはごくありふれた物質である。このような物質に対して、部分的なオーバーラップにより作り出されるオンゲストロームスケールの局所構造を明らかにしたこと、そこに特異的な鉱物炭酸塩化の能力があることを見出したことは学術的に意義がある。特筆すべきは、上記炭酸塩化プロセスが酸性溶液等を用いることなく、常温・常圧で即座に起こることである。このことは、エネルギー消費を伴わず、さらには廃液排出もなく二酸化炭素固定化が実現することを意味している。本研究結果は学術的に独創性が高いだけでなく、コスト面、大規模化、環境保全の観点から、ひいてはカーボンリサイクルの観点からも有望である。

研究成果の概要(英文)：The possibility of developing the functional open nanospace arising from the two-dimensional (2D) structure was explored for 2D inorganic nanoagglomerates as saponite silicate mineral. Nanoscale open spaces formed by partial overlap of 2D nanosheets in saponite possess angstrom-scale open spaces with reactive molecular sites such as nanosheet edges in their interior. It is found that CO₂ physisorption occurs on the nanosheet surfaces inside the open spaces under ambient conditions due to the quadrupole interaction between the alkali metal cations and CO₂ molecules. Thereby, CO₂ molecules are activated by picking off weakly-bound oxygen from octahedral sites at the nanosheet edges and carbonate species are stabilized on the nanosheet surfaces.

研究分野：環境物理

キーワード：機能性ナノ空間 二次元物質 ポジトロニウム 核磁気共鳴

1. 研究開始当初の背景

二次元無機ナノ凝集体は、数十ナノメートルからマイクロオーダーまで二次元的な広がりを持って周期配列する平面凝集体である。二次元無機ナノ凝集体を構成する物質としてケイ酸塩層状化合物であるサポナイト粘土鉱物が挙げられる。これらは電気伝導異方性など平面構造に起因する様々な新規機能特性が期待される。加えて、環境負荷がなく、資源的にも安定である。図 1(a)にサポナイトのナノシート構造を示す。このナノシートは、Si を中心とする酸素 4 面体シートが二層と Mg などの金属元素を中心とする酸素 8 面体シートから構成される。4 面体シートを構成する Si や、8 面体シートを構成する金属元素が一部価数の低い別の金属元素に置換、もしくは欠損しているため、層全体が負に帯電している。この負電荷を補償するため、層間にはナトリウムイオンなどのアルカリ金属イオンが入り込んでいる。4 面体シート表面には、4 面体頂点が構成する半径約 1.2 Å の酸素六員環が形成される(図 1(b))。よって、図 1(c)に簡略化された構造が、サポナイトの基本ユニットと考えることができる。この構造は無機層状化合物が一般的に示す単位構造である。

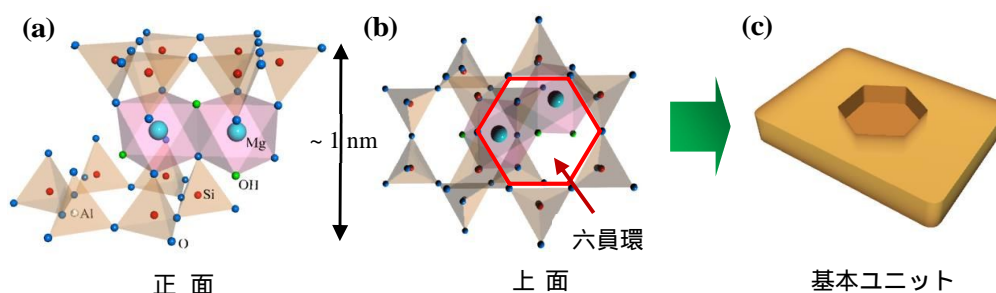


図 1 スメクタイト無機層状化合物のナノシート構造。

ナノシートが構成し得るナノ空間を図 2 に例示する。例えば、ナノ空間(a)は空間内壁にエッジ構造を露呈しているため、化学的に活性である。化学吸着を介して分子吸着や閉じ込め能が発現することが期待できる。一方、ナノ空間(b)のようにシート表面の六員環が対向して構築されたナノ空間は、セシウムイオンのような巨大イオン、あるいはアンモニア分子一個分を収容するサイズの空隙構造を持つ。幾何学的に強固な物質閉じ込めサイトとして機能することが期待できる。放射性セシウムを効率よく取り除くことができれば、東北地方の除染作業に貢献する。このように、ナノシートを任意幾何学的に空間配列することによりナノ空間を構築することができれば、二次元構造に起因する特異な電子状態、表面構造、エッジ構造のため、ナノ空間の機能特性が飛躍的に高くなることが予想される。しかしながら、ナノシートを用いた空間構築の概念は一般的ではない。

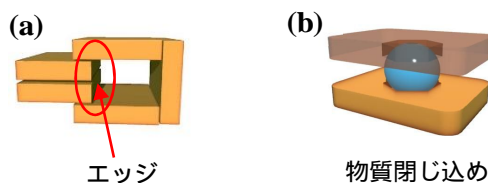


図 2 ナノシートが構成するナノ空間群と内部構造。

2. 研究の目的

本研究では、二次元構造に起因する特異な電子状態、及び局所構造に着目し、化学的活性性、優れた物質捕獲能を有する新規機能性ナノ空間を創成することを目的とする。二次元無機ナノ凝集体として、ケイ酸塩層状化合物であるサポナイト粘土鉱物に着目する。粘土鉱物は、厚さ約 1 ナノメートルで、数十ナノメートルからマイクロオーダーまでの二次元的な広がりを持つ二次元ナノシートを最小ユニットとした凝集体である。地殻を形成する鉱物の大部分を占め、地球上で最も産出量が多い。土壌にも豊富に含まれる。資源的にも安定であるだけでなく、環境負荷がないため、子供のおもちゃとしても用いられてきた。このような物質に対して、部分的なオーバーラップにより作り出されるオンゲストロームスケールの局所構造を明らかにすること、そこで発現する特異的な鉱物炭酸塩化能を見出すことを目的とする。特に、エネルギー消費を伴わず、さらには廃液排出もない二酸化炭素 (CO₂) 固定化の実現に向けて、酸性溶液等を用いることなく、常温・常圧で即座に起こる炭酸塩化プロセスに焦点を当てる。

3. 研究の方法

本研究では、以下の項目を推進した。

(1) 試料調整

二次元無機ナノ凝集体として、ケイ酸塩層状化合物であるナトリウム型サポナイトを採用した。水和・脱水挙動は示差熱重量同時測定 (TG-DTA) により評価した。1 M 塩化セシウム水溶液を用いてイオン交換を行い、ナノシート層間に物理吸着するナトリウムカチオンを部分的

にセシウムカチオンに置換した。導入されたセシウム濃は、高周波誘導結合プラズマ (ICP) 分析法により定量した。

(2) 溶出実験

セシウムを導入した試料に対して、 $\text{pH} = 0$ の硝酸溶液を用いて溶出実験を行った。溶出されたセシウムイオン濃度は、原子吸光法により定量した。

(3) 二酸化炭素導入

上記試料から水分子を除去するために、 10^{-5} Torr の真空中で 423 K で 8 時間処理した。水分子が除去された試料を大気に触れさせることなく、1 mbar の CO_2 雰囲気中に移動し、そこで 30 分間暴露した。 ^{13}C NMR 実験のために、平行して 50 mbar の $^{13}\text{CO}_2$ 雰囲気中で 30 分間暴露した。

(4) 核磁気共鳴実験

CO_2 吸着によって引き起こされる Cs サイトの変化を調べるために、 ^{133}Cs magic-angle spinning (MAS) 核磁気共鳴 (NMR) を推進した。さらに、 CO_2 サイトからも調べるために、 ^{13}C - CO_2 ガスフローを行い、 ^{13}C MAS NMR を推進した。これら二つの NMR 実験 (Carbon Hydrogen Nitrogen) Elemental Analysis (CHN 元素分析) などの化学分析データから、物理吸着と化学吸着を定量的に評価し、炭酸塩化により固定された CO_2 濃度を定量した。

(5) ポジトロニウム分光実験

上で述べたように、 CO_2 吸着に寄与するナノ空間は粘土鉱物のナノシートが部分的にオーバーラップすることにより局所的に生成される。ナノ空間量は、カチオン種や水和環境に依存して変化することがわかっている。そのため、様々な濃度のセシウムを導入したサポナイトに対してポジトロニウム (Ps) 寿命測定とガス吸着測定を推進し、ナノ空間の情報を得た。得られたナノ空間の情報、とりわけナノ空間濃度に着目し、炭酸塩化により固定された CO_2 濃度と比較した。

(6) フーリエ変換赤外吸収分光実験

CO_2 吸着によって引き起こされる結合状態の変化を調べるために、フーリエ変換赤外吸収分光 (FT-IR) 実験を推進した。FT-IR 実験では、とりわけナノシートを構成する 8 面体シートの結合状態に着目した。

4. 研究成果

TG-DTA の結果から、層間のカチオンに物理吸着した水分子は 423 K で 8 時間処理すると、完全に除去できていることがわかった。同様の熱処理を真空中で行うとさらに水分子が除去され、絶乾状態になっていることが推測される。

Ps 寿命測定により、半径にして 3 Å と 9 Å の二つのナノ空間が見出された。当グループでは、これまで Ps 分光法と分子動力学計算 (MD) を用いて、幾つかの粘土鉱物中には層間以外にもオンゲストロームスケールの空隙サイトが存在することを示している [1-3]。一つは層間にナノシートが 1 枚挿入されたタイプの分子構造で、もう一つはナノシートが 2 枚挿入されたタイプの分子構造である。上で見出された 3 Å と 9 Å のナノ空間は、ナノシートが 1 枚、2 枚挿入されて構築されたナノ空間に対応すると考えられる [1]。二つのサイトは、全てオンゲストロームスケールと微小である、粘土鉱物が軽元素から構成される、構造的に乱れている、層のエッジを含んでいる、などの理由から、透過型電子顕微鏡などの既存の微視的顕微法では観測が困難であり、これまで見出されてこなかったものである。

ICP 分析により、セシウム型サポナイトには濃度 0.04 mmol/g のセシウムカチオンが導入されていることがわかった (表 1 参照)。溶出実験、 ^{133}Cs NMR、放射性セシウム捕捉ポテンシャル実験のデータに基づいた解析によると、上記ナノ空間中で、ナノシート表面、ナノシートエッジ、酸素 6 員環が対向した局所構造がセシウム吸着サイトとして機能することがわかっている [4-5]。この解析では、導入されたセシウムの 69% がナノシート表面に物理吸着することが示されており、今回導入されたセシウムイオン濃度より 0.03 mmol/g に相当する。一方、CHN 元素分析の結果から、ナトリウム型とセシウム型サポナイトにはそれぞれ 0.02 wt. %、0.18 wt. % の炭素が含まれていることがわかった。CHN 元素分析前に試料は大気に触れることはなかったため、上記炭素濃度は導入された CO_2 に起因しているものと考えられる。よって、ナトリウム型、セシウム型サポナイトに吸着した CO_2 分子の濃度はそれぞれ 0.02 mmol/g、0.15 mmol/g と見積もられる。

表 1 導入されたセシウム濃度 C_{cesium} 、導入された炭素濃度 C_{carbon} 、導入された全二酸化炭素濃度 C_{CO_2} 、物理吸着に起因する二酸化炭素濃度 $C_{\text{Phys_CO}_2}$ 、化学吸着に起因する二酸化炭素濃度 $C_{\text{Chem_CO}_2}$ 。

	C_{cesium} [mmol/g]	C_{carbon} [wt. %]	C_{CO_2} [mmol/g]	$C_{\text{Phys_CO}_2}$ [mmol/g]	$C_{\text{Chem_CO}_2}$ [mmol/g]
ナトリウム型	0.00	0.019	0.02	0.014	0.002
セシウム型	0.04	0.183	0.15	0.134	0.019

図 3 に セシウム型サポナイトについて得られた CO_2 導入前後の ^{133}Cs MAS NMR スペクトルを示す。比較を容易にするため、差分スペクトルも併せて示している。化学シフト -134 ppm 付近に見られる大きなピークは、ナノシート表面に物理吸着したセシウムカチオンに対応する。一方、 -15 ppm 付近のブロードなピークは、 Cs_2O 化合物のものに相当する。 CO_2 導入により、セシウムカチオンのピークは僅かにシフトし、ブロードに変化した。この変化は、差分スペクトルより有意に確認できる。このことは、導入された CO_2 分子が、ナノシート表面のセシウムカチオンに吸着していることを示している。

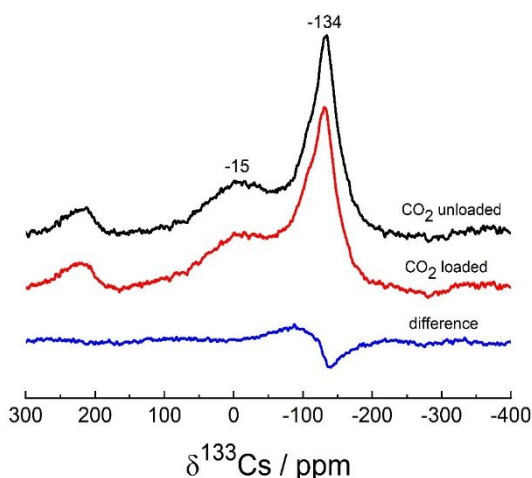


図 3 セシウム型サポナイトについて得られた CO_2 導入前後の ^{133}Cs MAS NMR スペクトル, およびそれらの差分スペクトル。

図 4 に (I) $^{13}\text{CO}_2$ を導入する前のセシウム型サポナイト, (II) $^{13}\text{CO}_2$ を導入したナトリウム型サポナイト, (III) $^{13}\text{CO}_2$ を導入した Cs 型サポナイト, (IV) $^{13}\text{CO}_2$ を導入した C セシウム型サポナイトを 200°C で 2 時間熱処理したのについて得られた ^{13}C MAS NMR スペクトルを示す。 $^{13}\text{CO}_2$ を導入する前のスペクトルには、有意なシグナルは確認できない。ナトリウム型サポナイトにおいて、 $^{13}\text{CO}_2$ 導入により 125 ppm と 170 ppm 付近にピークが見られる。このことは、導入された CO_2 分子が、ナノシート表面のナトリウムカチオンに吸着していることを示している。これら二つのピーク強度は、セシウム型サポナイトではより顕著になった。セシウム型サポナイトのナノシート表面に物理吸着するセシウムカチオンがナトリウム型のナトリウムカチオンよりも効率的に CO_2 を吸着することが推測できる。 200°C で 2 時間熱処理することにより、 125 ppm 付近のピークは消失した。一方で、 170 ppm 付近のピークは維持された。このことは、 125 ppm と 170 ppm 付近のピークがナノシート表面における物理吸着と化学吸着に起因していることを意味している。過去の先行研究より、 170 ppm 付近のピークは Cs_2CO_3 などの炭酸塩種と考えられる [6]。

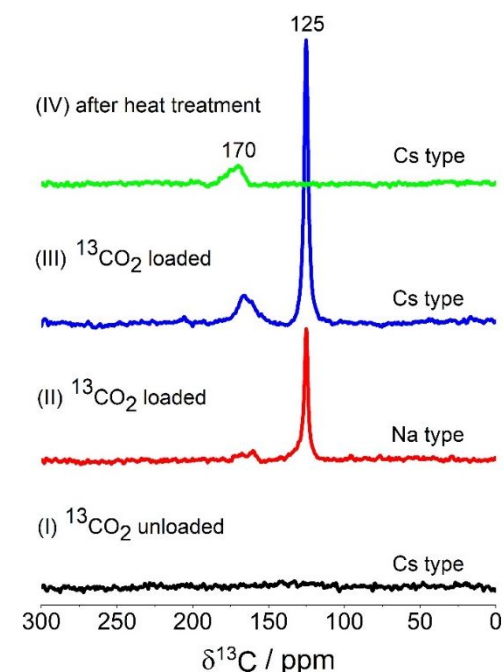


図 4 (I) $^{13}\text{CO}_2$ を導入する前のセシウム型サポナイト, (II) $^{13}\text{CO}_2$ を導入したナトリウム型サポナイト, (III) $^{13}\text{CO}_2$ を導入した Cs 型サポナイト, (IV) $^{13}\text{CO}_2$ を導入した C セシウム型サポナイトを 200°C で 2 時間熱処理したのについて得られた ^{13}C MAS NMR スペクトル。

ナノシート表面のアルカリ金属イオンに対して、 CO_2 物理吸着と化学吸着が同時に起こることは興味深い。 CO_2 物理吸着は、アルカリ金属イオンと CO_2 分子の四重極相互作用によるものと推測される。一方で CO_2 化学吸着は、ナノシート表面の二つのアルカリ金属イオンに CO_2 が炭酸塩 Cs_2CO_3 として安定化することで説明される。CHN 元素分析結果と ^{13}C MAS NMR より得られた物理吸着と化学吸着に起因する CO_2 濃度を表 1 に示す。導入された CO_2 の $\sim 13\%$ が炭酸塩種として即座に化学吸着することがわかる。このようなユニークな化学吸着は二次元物質を作るナノ空間の内部構造によって説明される。サポナイトは、4 面体と歪んだ 8 面体から成るナノシートが積層し、2:1 層状構造をとる。4 面体の頂点には酸素、中心にはシリコンが配位する。また 8 面体の頂点には、酸素原子と水酸基グループ、中心にはマグネシウムが位置する。サポナイトと同型のケイ酸塩物質であるスティーブンサイトでは、8 面体中心のマグネシウムが約 6.7% 欠損している。8 面体の結合に対するマグネシウム欠損の影響は、FT-IR スペクトルの波数 600 から 850 cm^{-1} の領域に確認できる (図 5 参照)。スティーブンサイトの FT-IR スペクトルは、波数 650 cm^{-1} 付近に大きなピーク、 775 cm^{-1} 付近に弱いピークを示した。 650 cm^{-1} 付近、 775 cm^{-1} 付近のピークはそれぞれ Si-O-Mg 、 Mg_3OH 変角振動に帰属される (黒とグレーの矢印)。8 面体中のマグネシウム欠損は上記振動の周波数を低下させるため、ピークが red シフトしている。 CO_2 導入後のサポナイトにおいても、 Si-O-Mg と Mg_3OH 変角振動のピークが red シフトしている様子が見て取れる。このことは、8 面体頂点の酸素

が消失していることを示唆している。

$^{13}\text{C}_8$, ^{13}C MAS NMR, FT-IR 分光の結果に基づいて、即座に起こる CO_2 化学吸着のメカニズムについて考察する。二次元ナノシートは様々な平面サイズを持つため、凝集体中ではきれいに重なり合うことはできない。そのため、ナノシートは部分的にオーバーラップし、内部にナノシートエッジを露呈したナノ空間を作り出す。Ps を用いたナノ空間計測データを基に分子動力学計算で実現された空間サイズはオングストロームスケールであり、その濃度は水和環境等にも依存するが、およそ数百 mmol/kg と高密度である [4-5]。これらナノ空間中に導入されたガス状の CO_2 分子の約 85% が四重極相互作用により物理吸着する。一方で、 CO_2 分子はナノシートエッジに弱くイオン結合した酸素原子を大気中でピックアップし、炭酸塩イオン CO_3^{2-} として活性化する。これにより、導入された CO_2 分子の約 15% がナノ空間内表面に存在するアルカリ金属イオンに化学吸着し、安定に固定される。特筆すべきは、上記炭酸塩化プロセスが酸性溶液等を用いることなく、常温・常圧で即座に起こることである。このことは、粘土鉱物凝集体中のナノ空間には、エネルギー消費を伴わず、さらには廃液排出もなく CO_2 固定化が実現することを意味している。

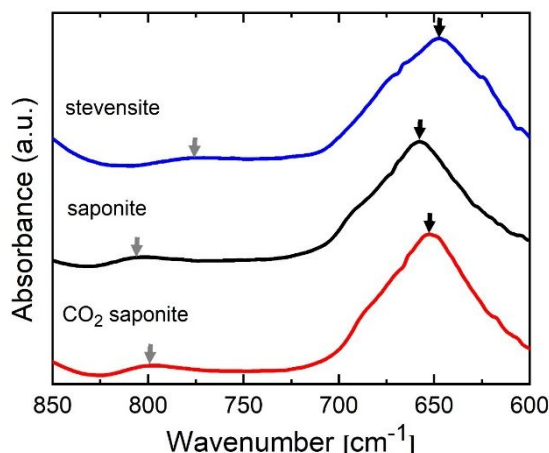


図5 スティーブンサイト, CO_2 導入前後のサポナイトについて得られたFT-IR スペクトル。

参考文献

- [1] K. Sato et al., *J. Phys. Chem. C* **116**, 22954 (2012).
- [2] K. Sato et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16**, 10959 (2014).
- [3] K. Sato et al., *Appl. Phys. Lett.* **104**, 131901 (2014).
- [4] K. Sato et al., *J. Phys. Chem. C* **120**, 1270 (2016).
- [5] K. Sato et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **19**, 18481 (2017).
- [6] K. Sato et al., *J. Phys. Chem. C* **117**, 14075 (2013).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 K. Numata, K. Sato, K. Fujimoto, and K. Kawamura	4. 巻 2182
2. 論文標題 Open Space Formation with Mechanically-Bent Single Layer of Inorganic Minerals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Proceedings	6. 最初と最後の頁 0500171-0500175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5135860	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 Y. Kobayashi, M. Yamawaki, T. Oka, K. Sato, N. Uesugi, K. Hattori, N. Nagasawa, and M. Washio	4. 巻 2182
2. 論文標題 Structural Evolution of Deformed Polyethylene Studied with Positrons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Proceedings	6. 最初と最後の頁 0500201-0500205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5135863	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 Yong Zhao and Kiminori Sato	4. 巻 114
2. 論文標題 Mechanism of glass-forming ability enhancement upon micro solute addition for Ce-Ga-Cu-Ni bulk metallic glasses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Intermetallics	6. 最初と最後の頁 1066031-1066035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.intermet.2019.106603	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 Kiminori Sato, Yong Zhao, and Minoru Kamaya	4. 巻 21
2. 論文標題 Structural reconfigurations of nanosheet arrays in layered mineral caused by wave irradiation: desorption mechanism of Cs from nanosheet edges	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chem. Phys. Phys. Chem.	6. 最初と最後の頁 16345-16352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CP03685G	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 A. Lazaro, K. Sato, H.J.H. Brouwers, and J. W. Geus	4. 巻 267
2. 論文標題 Pore structure development of silica particles below the isoelectric point	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Microporous & Mesoporous Materials	6. 最初と最後の頁 257-264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.micromeso.2018.03.031	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 Y. Zhao, P. F. Liu, L. Wu, B. Zhang, K. Sato	4. 巻 100
2. 論文標題 The role of open spaces to glass-forming ability in bulk metallic glasses	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Intermetallics	6. 最初と最後の頁 112-115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.intermet.2018.06.011	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 Kiminori Sato	4. 巻 122
2. 論文標題 Study of Salt Precipitation in Polymer Electrolytes Based on PEO and EMImTf Ionic Liquid	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 7009-7014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b04429	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 Yong Zhao, Bo Zhang, and Kiminori Sato	4. 巻 7
2. 論文標題 Positron Lifetime Studies for Ce-based Bulk Metallic Glasses	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JJAP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 0111031-0111035
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 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 佐藤公法, 中島輝	4. 巻 67
2. 論文標題 認証標準物質を用いて環境試料の放射能濃度定量を行う放射線教育用教材の開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 RADIOISOTOPES	6. 最初と最後の頁 583-589
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3769/radioisotopes.67.583	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 Kiminori Sato and Minori Kamaya	4. 巻 153
2. 論文標題 Origin of enhanced boric acid adsorption in light-burned magnesium oxide	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 1247041-1247048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0025455	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 Kiminori Sato and Masataka Nakata	4. 巻 124
2. 論文標題 Alternation Mechanism of Lead Sulfate toward Lead Sulfide under Sulfuric Acid Condition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 19616-19621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c05335	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 Kiminori Sato and Nagayasu Oshima	4. 巻 91
2. 論文標題 Evaluation Methodology of Diffusion Coefficient of Guest Substances Associated with Angstrom-Scale Open Spaces in Materials by Slow Positron Beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review Scientific Instrument	6. 最初と最後の頁 0839071-0839075
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0012254	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 Kiminori Sato and Michael Hunger	4. 巻 3
2. 論文標題 Carbon dioxide adsorption in open nanospaces formed by overlap of saponite clay nanosheets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Chemistry	6. 最初と最後の頁 91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42004-020-00346-5	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 Kenji Shinozaki, Go Okada, Kiminori Sato, Ruize Yu, and Mario Affatigato	4. 巻 489
2. 論文標題 Impact of crystallization method on the strain, defect formation, and thermoluminescence of YAG: Ce crystals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 1566001-1566006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2020.156600	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4件(うち招待講演 3件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Kiminori Sato
2. 発表標題 Study of Molecular Dispersion into Materials by Positrons Coupled with Other Techniques
3. 学会等名 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤公法
2. 発表標題 バイオ炭中の硝酸イオン吸着サイトに関する研究
3. 学会等名 第56回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiminori Sato
2. 発表標題 Molecular confinement in open spaces formed by two-dimensional inorganic nanosheets
3. 学会等名 18th International Conference on Positron Annihilation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kiminori Sato
2. 発表標題 Application of positronium annihilation spectroscopy to open-space analysis in soft materials
3. 学会等名 Damage in polymeric materials: from the molecular to the macroscopic scale (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018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

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		
ドイツ	University of Stuttgart		