

令和 4 年 9 月 12 日現在

機関番号：12604

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：2019～2021

課題番号：18KK0382

研究課題名（和文）ありふれた二次元ナノ物質を用いた機能性超空間の開発

研究課題名（英文）Development of functional open spaces using well-known two-dimensional nanomaterials

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） 11,500,000円

渡航期間： 2ヶ月

研究成果の概要（和文）：粘土鉱物凝集体の基本ユニットである二次元ナノシートのオーバーラップはナノスケールの空間を生成し、空間内部にナノシートエッジのような活性サイトを有する。このようなナノ空間への二酸化炭素吸着について、固体核磁気共鳴およびポジトロニウムを用いたナノ空間解析により調べた。二酸化炭素は常温常圧でナノ空間内表面に物理吸着する。一方で、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、炭酸塩イオンとして活性化する。これにより、二酸化炭素がナノ空間内表面のアルカリ金属イオンに化学吸着される。上記ふたつの二酸化炭素吸着はアルカリ金属イオン濃度に敏感に影響されることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粘土鉱物のようなごくありふれた物質に対して、基本ユニットである二次元ナノシートのオーバーラップにより作り出されるナノ空間および空間内表面の局所構造を明らかにしたこと、そこで特異的な二酸化炭素吸着能があること、さらに二酸化炭素吸着能がセシウムイオンなど層間のアルカリ金属イオン濃度に敏感に影響されることを見出したことは学術的に意義がある。本研究で見出した二酸化炭素吸着は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おり、カーボンリニュートラルの観点からも意義がある。

研究成果の概要（英文）：Nanoscale open spaces formed by partial overlap of two-dimensional nanosheets in clays, abundantly and ubiquitously available, possess reactive molecular sites such as nanosheet edges in their interior. Here, the capture and storage of CO₂ molecules in open spaces within saponite clay are explored by solid-state nuclear magnetic resonance coupled with open space analysis using positronium. CO₂ physisorption occurs on the nanosheet surfaces inside the open spaces under ambient conditions. 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. It is found that the above CO₂ adsorption is sensitively influenced by the Cs concentration.

研究分野：環境物理学

キーワード：二次元物質 機能性ナノ空間 二酸化炭素吸着

1. 研究開始当初の背景

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。我々の身の回りにありふれた二次元物質である。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。資源的に安定であるだけでなく、環境負荷がないため、教育用教材や子供のおもちゃとしても用いられてきた。二次元ナノシートは様々なサイズを持つため、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空間（ナノ空間）を作り出す [1-2]。ポジトロニウム (Ps) を用いたナノ空間計測データを基に分子動力学 (MD) 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 [3-4]、その濃度は水和環境等にも依存するが、おおよそ数百 mmol/kg と高密度である [5-6]。ナノシートが構成するナノ空間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、シート表面の六員環が対向して構築されたナノ空間は、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。このようなナノ空間には、実際にセシウムイオンが特異的に強く吸着するサイトとなることがわかっている。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。

2. 研究の目的

化石燃料の使用により排出される二酸化炭素 (CO₂) は地球温暖化に及ぼす影響が大きい温室効果ガスであり、大気中への CO₂ 排出量削減はグローバルな課題である。大気中への排出量削減を鑑み、CO₂ の分離・回収、さらには再利用を目指した技術開発が積極的に推し進められている。とりわけカーボンリサイクルでは、排出された CO₂ を炭素化合物に変換するプロセスが重要になる。例えば、CO₂ 地層貯留の観点から期待されている mineral carbonation (鉱物炭酸塩化) は数百年から数千年もかかるプロセスである。反応促進のために高温・高圧環境下で酸性溶液を使用する場合、エネルギー消費と廃液排出が避けられなくなる。加えて無極性分子である CO₂ は化学的に安定しているため、カーボンリサイクルの多大なエネルギー消費に伴い逆に CO₂ 排出量が大きくなるなど、技術的障壁は高い。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、優れた分子吸着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スメクタイト粘土鉱物に着目する。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グ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 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 [7-8]。

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。モル濃度 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 M の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。上記濃度でイオン交換を行った試料をそれぞれ Na-type, Cs-type 1, Cs-type 2, Cs-type 3, Cs-type 4 と表記することにする。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 CO₂ 雰囲気中に移動し、そこで 30 分間暴露した。¹³C NMR 実験のために、平行して 50 mbar の ¹³CO₂ 雰囲気中で 30 分間暴露した。

(4) 核磁気共鳴実験

CO₂ 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、¹³³Cs magic-angle spinning (MAS) 核磁気共鳴 (NMR) を推進した。さらに、CO₂ サイトからも調べるために、¹³C-CO₂ ガスフローを行い、¹³C 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 CO₂ 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、CO₂ 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 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 CO₂ 濃度と比較した。

(6) フーリエ変換赤外吸収分光実験

CO₂ 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。

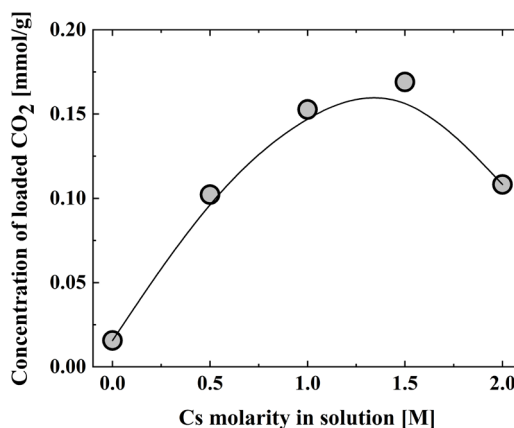


図 1 セシウムモル濃度に対してプロットした二酸化炭素濃度。

4. 研究成果

表 1 に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 $c_{Phys_CO_2}$, 化学吸着に起因する二酸化炭素濃度 $c_{Chem_CO_2}$ を示す [7-8]. 溶出実験により得られたセシウム濃度 c_{cesium} は、溶液のセシウムモル濃度とともに増加した。より多くのセシウムイオンが導入されていることがわかる。溶出実験、¹³³Cs 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 [3, 9]. これら中で、ナノシートエッジと酸素 6 員環が対向した局所構造に吸着したセシウムイオンは、pH 1 の高濃度酸でも除去できないことがわかっている [3]. よって、セシウム濃度 c_{cesium} は基本的にナノシート表面の物理吸着に起因するものと推測される。一方、CHN 元素分析で得られた炭素濃度 c_{carbon} はセシウムモル濃度 1.5 まで増加傾向を示したが、セシウムモル濃度 2.0 では減少した。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 CO₂ に起因しているものと考えられる。計算された全二酸化炭素濃度 c_{CO_2} は、 c_{carbon} と同様にセシウムモル濃度 1.5 まで増加傾向を示したが、セシウムモル濃度 2.0 では減少した (図 1)。

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 $c_{Phys_CO_2}$, 化学吸着に起因する二酸化炭素濃度 $c_{Chem_CO_2}$.

	c_{cesium} [mmol/g]	c_{carbon} [wt. %]	c_{CO_2} [mmol/g]	$c_{Phys_CO_2}$ [mmol/g]	$c_{Chem_CO_2}$ [mmol/g]
ナトリウム型	0.00	0.019	0.02	0.014	0.002
セシウム型 1	0.441	0.123	0.10	0.090	0.013
セシウム型 2	0.529	0.183	0.15	0.134	0.019
セシウム型 3	0.580	0.203	0.17	0.148	0.021
セシウム型 4	0.585	0.130	0.11	0.095	0.013

図 2 に セシウム型サポナイトについて得られた CO₂ 導入前後の ¹³³Cs 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、Cs₂O 化合物のものに相当する。CO₂ 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 CO₂ 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に Na-type, Cs-type 1, Cs-type 2, Cs-type 3, Cs-type 4 について得られた ^{13}C MAS NMR スペクトルを示す [8]. Na-type 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, セシウムモル濃度の増加とともに顕著になった. Cs-type のナノシート表面に物理吸着するセシウムカチオンが Na-type 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. 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 [3].

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 ^{12}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 [7-8]. 導入された CO_2 の約 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4). 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.

先述したように, 溶出されたセシウム濃度 c_{cesium} は基本的にナノシート表面の物理吸着に起因するものと考えられる.

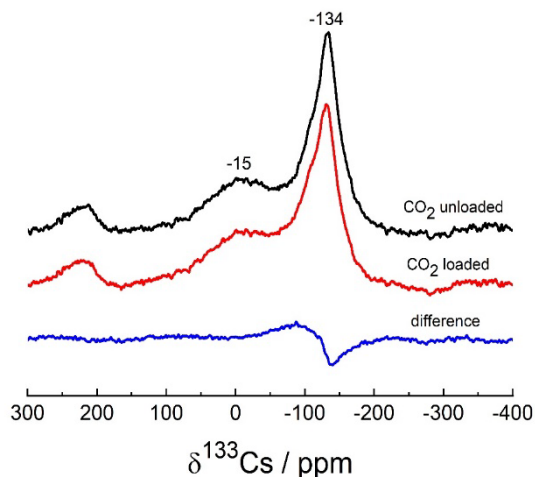


図2 セシウム型サポナイトについて得られた CO_2 導入前後の ^{133}Cs MAS NMR スペクトル, およびそれらの差分スペクトル.

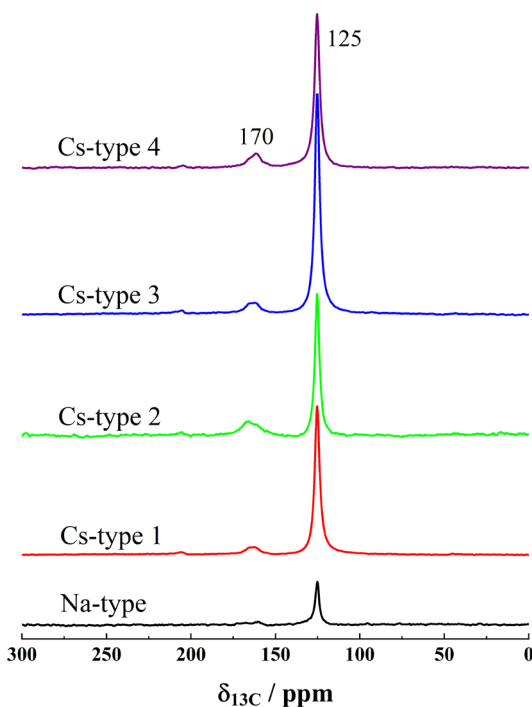


図3 Na-type, Cs-type 1, Cs-type 2, Cs-type 3, Cs-type 4 について得られた ^{13}C MAS NMR スペクトル.

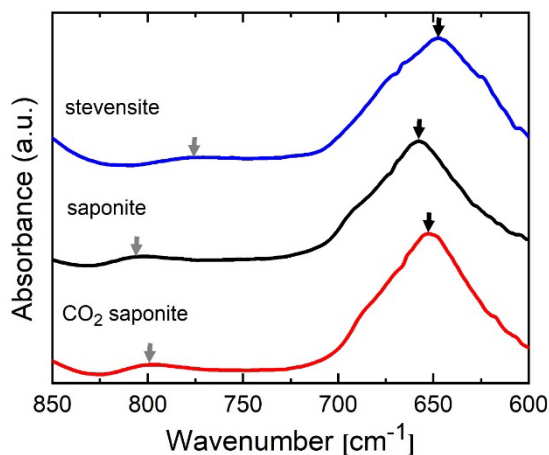


図4 スティーブンサイト, CO_2 導入前後のサポナイトについて得られた FT-IR スペクトル.

よって以下の議論では、溶出されたセシウムはナノシート表面のセシウムに等しいと仮定する。全二酸化炭素濃度 c_{CO_2} , ^{13}C MAS NMR スペクトルの二つのピーク強度比から求めた二酸化炭素濃度の物理吸着成分, 化学吸着成分を表 1 に示す。理吸着成分, 化学吸着成分ともに, c_{cesium} が $0.580 \text{ mmol g}^{-1}$ まで増加し, その後減少した。全ての c_{cesium} に渡って, 導入された CO_2 のおよそ 13% が即座に化学吸着していることがわかる。

^{133}Cs , ^{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, おおよそ数百 mmol/kg と高密度である [5-6]。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 (図 5)。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。

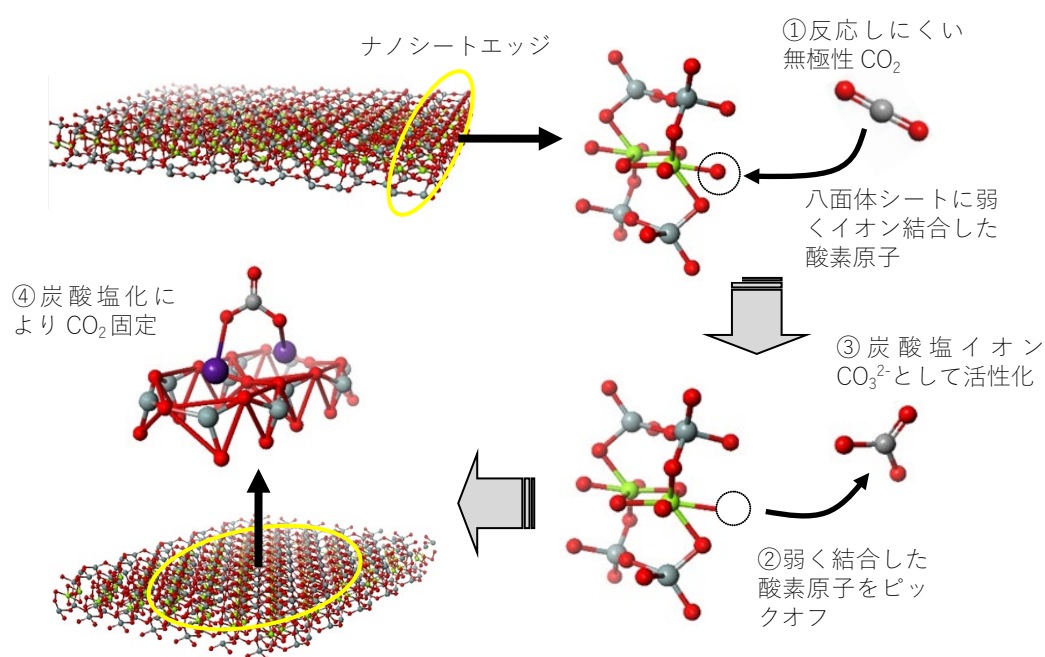


図 5 粘土鉱物表面への CO_2 固定化のメカニズム。無極性 CO_2 (①) は八面体シートに弱く結合した O 原子をピックアップし (②), 炭酸塩イオン CO_3^{2-} として活性化する (③)。活性化した CO_3^{2-} はナノシート表面に化学吸着により固定化される (④)。

参考文献

- [1] K. Sato et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16**, 10959 (2014).
- [2] K. Sato et al., *Appl. Phys. Lett.* **104**, 131901 (2014).
- [3] K. Sato et al., *J. Phys. Chem. C* **117**, 14075 (2013).
- [4] K. Sato et al., *Chem. Phys. Phys. Chem.* **21**, 16345 (2019).
- [5] K. Sato et al., *J. Phys. Chem. C* **120**, 1270 (2016).
- [6] K. Sato et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **19**, 18481 (2017).
- [7] K. Sato et al., *Communications Chemistry* **3**, 91 (2020).
- [8] K. Sato et al., *J. Phys. Chem. C* **125**, 4878 (2021).
- [9] K. Sato et al., *J. Phys. Chem. C* **116**, 22954 (2012).

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 4件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Kiminori Sato, Akinori Yamamoto, Michael Dyballa, and Michael Hunger	4. 巻 15
2. 論文標題 Molecular adsorption by biochar produced by eco-friendly low-temperature carbonation investigated using graphene structural reconfigurations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Green Chemistry Letters and Reviews	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/17518253.2022.2048090	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 Kiminori Sato and Kenji Ito	4. 巻 92
2. 論文標題 Improvement of the far-infrared optical property for glasses by plasma-assisted dispersion of fluorocarbon species into the shallow surface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instrument	6. 最初と最後の頁 63905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0046936	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, Takuma Orihara, Michael Dyballa, and Michael Hunger	4. 巻 125
2. 論文標題 Instantaneous ex situ Mineral Carbonation Relevant to Alkali Metals in Clay Nanoparticles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 4878-4884
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c11521	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 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 該当する

1. 著者名 Kenji Shinozaki, Go Okada, Kiminori Sato, Ruize Yu, and Mario Affatigato	4. 巻 849
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 該当する

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 of Scientific Instrument	6. 最初と最後の頁 83907
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 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 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 124704
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 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 50017
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 50020
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kiminori Sato
2. 発表標題 The role of Ce packing state in glass-forming ability for Ce-based bulk metallic glasses
3. 学会等名 III International Conference and School <Synthesis, structure and properties of high-entropy materials> (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

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

〔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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	マイケル フンガー (Michael Hunger)	シュツットガルト大学・化学工学研究所・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			
ドイツ	シュツットガルト大学			