

令和 3 年 4 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01944

研究課題名（和文）ナノイオニクスに基づく有機無機ペロブスカイトヘテロ構造の動的形成と1粒子反応解析

研究課題名（英文）Dynamic formation and single-particle reaction analysis of heterostructured organic-inorganic perovskites based on nanoionics

研究代表者

立川 貴士 (Tachikawa, Takashi)

神戸大学・分子フォトサイエンス研究センター・准教授

研究者番号：20432437

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,000,000円

研究成果の概要（和文）：有機無機ペロブスカイトは次世代の太陽電池・発光デバイス材料として注目されている。一方で、結晶中のハロゲン化物イオンは室温でも動き回ることが知られており、この高い柔軟性がデバイス性能に及ぼす影響は十分に理解されていない。本研究では、ペロブスカイトナノ結晶のハロゲン組成を形状と発光効率を維持したまま変換することに成功した。また、1粒子発光観測などから、発光挙動や結晶構造が時々刻々と変わる様子をとらえ、イオン組成を制御するための指針を獲得した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有機無機ペロブスカイトナノ結晶で観測された構造変換過程は、イオン交換に基づくナノ材料合成プロセスの理解に加え、コア-シェル構造など、多様な構造を有するイオン性ナノ結晶の設計および合成指針の確立に有用である。また、有機無機ペロブスカイトの構造柔軟性はデバイスの耐久性低下などネガティブな印象があるが、この特徴を積極的に活かすことで、環境や外部刺激に応答する新しい機能性材料やデバイスへの応用展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：Hybrid organic-inorganic perovskites have received much attention as potential next generation solar cells and as materials for light-emitting devices. However, the halide ions inside the crystals are known to move around even at room temperature, and this high flexibility causes issues related to their device performance. We have succeeded in completely substituting the halide ions of perovskite nanocrystals while maintaining their morphology and light-emitting efficiency. Furthermore, by using techniques such as single-particle photoluminescence imaging, we observed the momentary changes in light emission and the crystal structure, which in turn enabled them to develop a principle for controlling ion composition. It is expected that these results will contribute towards enabling the synthesis of perovskites with various compositions.

研究分野：光化学

キーワード：有機無機ペロブスカイト ナノイオニクス 単一粒子分光 イオン交換反応

1. 研究開始当初の背景

シリコン太陽電池に匹敵する高い変換効率を持ち、製造コストも低い有機無機ペロブスカイト太陽電池は、次世代太陽電池のひとつとして実用化が期待されている。一方、劣化が早いなど、安定性に大きな課題を残している。その一因として、室温付近の熱エネルギーや局所電場によって容易に誘発されるイオン拡散による構造の組み換えが、実験と理論の両面から指摘されている。したがって、微視的領域におけるイオン挙動の制御がペロブスカイトデバイスの安定性を向上させる鍵といえる。

ペロブスカイト構造 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$)) (図1) を構成するハロゲン化物イオンの一部を異なるイオンと交換することで、光電変換効率の向上と多色化(バンドギャップの調整)が可能となる。このようなイオン交換反応はいわゆるナノイオニクス現象の一種であり、異なる半導体が接合した状態であるヘテロ構造を創り出すことができるなど、新物質・新機能を創出するための有力なアプローチである。例えば、イオン組成の空間分布を変えるだけで、電池や触媒の駆動源である電荷キャリア(ここでは光生成電子と正孔)の移動方向や速度を自在に制御できる。したがって、ペロブスカイトにおける構成イオンの交換や拡散を原子・分子スケールで理解し、制御することができれば、太陽電池の性能向上に加え、微弱な外部刺激によってイオンを駆動させることで可逆的に発光特性が変化する光ナノスイッチング素子を開発できるはずである。

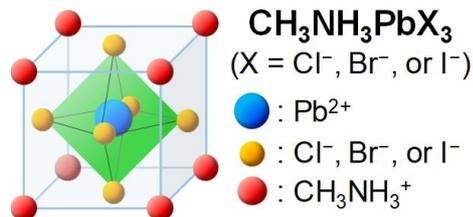


図1. 有機鉛ハロゲン化物ペロブスカイトの構造.

2. 研究の目的

本研究では、有機鉛ハロゲン化物ペロブスカイトにおけるヘテロ構造の形成過程と電荷キャリアの動的挙動を1粒子レベルで分光観測し、その機構を明らかにする。1粒子分光法は、発光の強度ゆらぎ、寿命、スペクトルなどの情報を相補的かつ統合的に解析することで、粒子中の励起子や電荷キャリアの反応挙動を詳細に調べることができる。しかし、構成イオンが交換可能な発光性半導体系では、反応によって発光波長が可視から赤外領域に大きくシフトするため、その様子を追跡することが技術的に困難であった。上で述べたように、ペロブスカイトの発光波長は可視光領域にあり、ハロゲン組成の変化によって大きく変化するため、構造変化の追跡が容易である。1粒子レベルのその場観測から得られた知見に基づき、イオン交換反応を精密に制御し、発光特性を大きく変化させることができる技術と学理を創成する。さらに、光や熱などの外部刺激によってイオンを駆動することで発光特性を自在に制御できる光ナノ素子を開発する。以上の研究から、「光ナノイオニクス」という新たな学術分野の開拓を目指す。

3. 研究の方法

(1) 有機鉛ハロゲン化物ペロブスカイトの合成と構造・光特性評価

再沈法を用い、様々な組成、サイズ、形状の有機鉛ハロゲン化物ペロブスカイトを合成した。例とし、約90 nmの $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ナノ粒子の合成法を述べる。まず、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ と PbI_2 をγ-ブチロラクトン溶媒に溶かし、前駆体溶液を調整した。前駆体溶液を試験管にいれ、攪拌しながらジクロロメタンを一気に加えた後、オクチルアミンをジクロロメタンに加えた溶液を攪拌しながら滴下した。遠心分離を行い、沈殿物をジクロロメタンで洗浄した後、ジクロロメタンに分散させた。得られたペロブスカイトの構造は、走査型および透過型電子顕微鏡(SEMおよびTEM)、粉末X線回折(XRD)、X線光電子分光(XPS)などによって解析した。定常状態吸収・蛍光スペクトルおよび蛍光寿命の測定から、バンドギャップ、発光量子収率、発光寿命などの吸収・発光特性を決定した。

(2) 1粒子発光顕微鏡観測

ハロゲン交換反応の1粒子発光観測には倒立型蛍光顕微鏡(Nikon, Ti-E)をベースとする自作の時間分解1分子蛍光顕微鏡システムを用いた。フローセルに固定されたサンプルに、100倍の油浸対物レンズ(Nikon, CFI Plan Apo 100x, NA = 1.45)を介して405 nm CWレーザー(Coherent)を照射し、同じ対物レンズで発光を集光した。異なる波長領域の発光を同時に観測できる二色イメージングにはW-VIEW GEMINI(浜松ホトニクス)を用いた。反応物である $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ の発光と、生成物である $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ の発光を分離観測するため、ダイクロイックミラー(Semrock, Di02-R561)、593 nmのロングパスフィルター(Semrock, FF01-593/LP)と510-560

nm のバンドパスフィルター (Semrock、FF01-535/50) を用いた。分割した発光は EMCCD カメラ (Roper Scientific、Evolve 512) で検出した。交換反応にはステンレス製フローセルを用いた。 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ナノ粒子分散液をスピンコートしたカバーガラスをフローセルに固定し、オクチルアンモニウムブロマイド溶液をシリンジポンプでフローした。

4. 研究成果

(1) ペロブスカイトナノ粒子におけるハロゲン交換過程の1粒子発光観測と機構解明

本研究では、自作のフローリアクターを用いることで、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ナノ粒子の形状と発光効率をほぼ維持したまま、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ナノ結晶に変換することに成功した。以下、詳細について述べる。

図 2a に二波長イメージングから得られた 1 粒子発光像を示す。交換反応の進行によって反応物である $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ の発光 ($>593 \text{ nm}$) が減少し、ある時間が経過した後に生成物である $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ の発光 ($510\text{-}560 \text{ nm}$) が観測された。生成物の形状、組成、結晶構造を解析したところ、立方晶の $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ ナノ粒子が生成したことがわかった。また、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ の発光量子収率は $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ とほぼ等しい。以上の結果から、ハロゲン交換反応によって、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ナノ粒子から $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ ナノ粒子への構造変換を発光効率を維持したまま達成し、1 粒子レベルで捉えることに成功したといえる。

二波長イメージングで観測された発光強度の時間変化を示す。図 2b が多数粒子のアンサンブル平均、図 2c が 1 粒子について発光強度の時間変化である。アンサンブル平均では反応物、生成物ともに比較的連続的な変化を示しているが、1 粒子では急激な変化がみられる。また、1 粒子では、数十秒以上にわたって発光が観測されない暗状態が観測され、さらに暗状態の後に $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ の発光が一段階で立ち上がる様子が観測された。アンサンブル平均で観測された連続的な変化は、個々の粒子の急激な変化の足し合わせであり、発光変化の特徴が平均化によって失われている。観測された暗状態は二つの発光状態の間に中間状態が存在していることを示唆している。暗状態は無輻射失活によって発光が消光されていることを示唆しており、欠陥を多く含む構造体であることが予想される。XRD データのリートベルト解

析から、反応の進行に伴い $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ およびヨウ化物イオンと臭化物イオンが混合した状態である $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(I_{1-x}\text{Br}_x)_3$ のドメインサイズが減少し、その後、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ のドメインが出現し、徐々に成長していくことがわかった。1 粒子で観測された暗状態は、これらのドメインが分離した中間状態であると考えられる。中間状態ではドメイン間に多くの欠陥が存在しているため発光が消光され、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(I_{1-x}\text{Br}_x)_3$ ドメインと臭素リッチドメインの混合が起こった瞬間に $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 由来の緑色発光が観測されるようになったと考えられる。

反応物 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) から暗状態への過程ではドメインの分離、暗状態から生成物 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$) への過程ではドメインの混合による結晶構造の転移が起こっているはずである。構造転移のダイナミクスを明らかにするため、シグモイド関数を用いた解析から速度論的パラメータを決定した。例えば、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ の発光が消光してから $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ の発光が生じるまでの時間に対応する τ_{off} は粒子サイズの増加に伴い、長くなることがわかった。粒子内イオン拡散が構造変化の律速過程であると仮定した場合、イオン拡散の拡散係数は $3.1 \times 10^{-12} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ と見積もられた。この値は報告されているペロブスカイト内のハロゲン化物イオンの拡散係数と良い一致を示したことから、観測された発光挙動はイオン拡散によって引き起こされる構造の組み換えによると結論付けた。

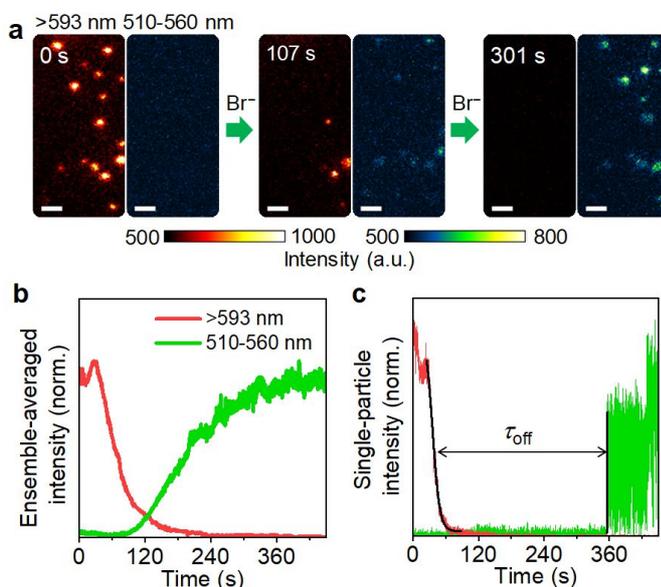


図 2. (a) 二波長 1 粒子発光イメージ。スケールバーは $2 \mu\text{m}$ 。アンサンブル平均(b)および 1 粒子(c)での発光強度の時間変化。

(2) 混合型ペロブスカイトナノ粒子の光誘起発光および構造変化

本研究では、ハロゲン混合型有機無機ペロブスカイト ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{Br}_{0.5}\text{I}_{0.5})_3$) ナノ粒子を対象に、室温でのイオン交換反応や光照射によって誘起される構造-発光変化を1粒子レベルでその場観測し、その機構の一端を明らかにした。

図 3a に 405 nm のレーザー照射下において観測された発光スペクトルの時間変化を示す。光照射直後、ナノ粒子は 640 nm 付近に発光ピークを示し、光照射を続けると強度を増加しながら 720 nm 付近まで連続的にレッドシフトしていく様子が観測された。この変化は数十秒で飽和し、光照射中に臭素リッチドメインに由来する発光ピーク (500–600 nm) は出現しなかった。発光強度変化を対し、単一指数曲線フィッティングを行うことで個々のナノ粒子の発光増加 (k_{forward}) および暗状態下での発光減少 (k_{backward}) の速度を決定した。これらの値は粒子によって異なることから、これらのパラメータはナノ粒子の構造不均一性と関連していることが推測される。 k_{backward} の平均値はとなり、同じハロゲン組成比の薄膜で得られた値 ($k_{\text{backward}} = 6.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) と比べ、かなり大きい値となった。 k_{backward} はペロブスカイトの構造ダイナミクスを反映しているはずである。ナノ粒子の回復速度が速い理由として、ナノ粒子では薄膜と比較するとイオンの拡散係数が大きいことや光照射によって構造変化が引き起こされた領域が微小であることが考えられる。

温度依存性の実験から、 k_{forward} および k_{backward} のアレニウスプロットを行い、活性化エネルギーをそれぞれ $0.43 \pm 0.02 \text{ eV}$ と $0.32 \pm 0.04 \text{ eV}$ と決定した。これらはペロブスカイト薄膜で報告されたハロゲン化物イオンの拡散における活性化エネルギー ($0.17 \sim 0.43 \text{ eV}$) と近い値である。このことから、ナノ粒子の光照射による発光変化は、ナノ粒子表面のハロゲン化物イオン空孔を媒介としたイオン拡散によって誘起されたものと示唆される。

次に 574–626 nm および 672–696 nm の2つのバンドパスフィルターを使用して、1粒子二波長同時発光イメージングを用いた。前者は合成した $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{Br}_{0.5}\text{I}_{0.5})_3$ ナノ粒子に対応する波長であり、後者は光照射変化により発生する発光波長に対応している。 k_{backward} が k_{forward} に近いが、それよりも大きくなるような低い励起光強度において、長波長のチャンネルでのみバースト状の信号が観測された。一方、合成した粒子の発光に対応する短波長側の発光は強度の変動が確認されず、ほぼ一定の強度を保つ、またはゆっくり減少していった。このように発光の変化が連動していないことから、赤色発光の急激な強度変化は電荷捕捉などによる発光明滅(いわゆるプリンキング現象)ではなく、バンドギャップの狭い局所的なドメイン構造の形成と解離の速度論に関連していると予想される。粒子あたりの発光バーストの出現頻度は、励起光強度の増加に伴い増加することがわかった。

バーストの発光持続時間 τ_{on} のヒストグラムを単一指数関数によりフィッティングを行った結果、平均寿命 $\langle \tau_{\text{on}} \rangle$ は約 7 s であることがわかった。この値の逆数は過渡的なドメインの解離速度を反映していると考えられ、 k_{backward} と近い値となった。これらの結果から、光照射による発光の長波長シフトはバンドギャップの狭い局所的なドメインの濃度が徐々に増えることに起因していると考えられる。

(3) 二次元ペロブスカイト材料や局所的ハロゲン交換反応への展開

二次元ペロブスカイト材料における光誘起構造変化の機構解明を目指して研究を展開した。具体的には、Br および I を含むハロゲン混合型ペロブスカイトナノシートを合成し、溶媒中における発光挙動を1粒子発光法によって観測した。得られた発光スペクトルからナノシートのハロゲン組成や層数を決定するとともに、これらが光照射下における構造変化に及ぼす影響を明らかにした。また、光化学反応によるハロゲン組成変換の空間制御を目指し、研究分担者と協働して1粒子発光観測を行った。局所的に光照射を行うことで、出発物質である Br 体ペロブスカイトを部分的に Br-I 混合型ペロブスカイトに変換することに成功した。

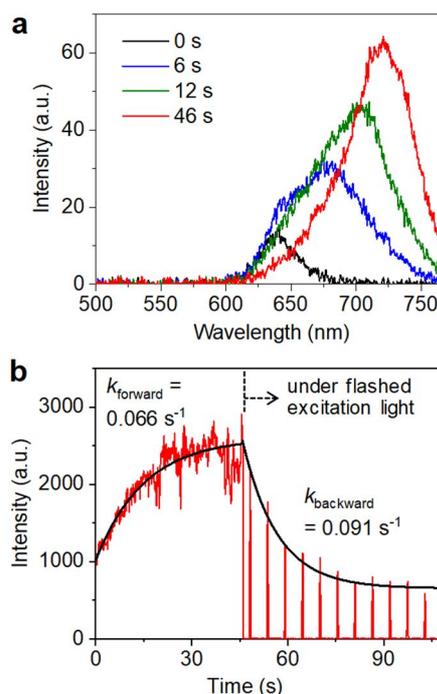


図 3. (a) $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{Br}_{0.5}\text{I}_{0.5})_3$ ナノ粒子について観測された1粒子発光スペクトル変化. (b) 発光強度変化. 戻り過程を観測するため、断続的に励起光を照射した.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Karimata Izuru, Tachikawa Takashi	4. 巻 60
2. 論文標題 In Situ Exploration of the Structural Transition during Morphology and Efficiency Conserving Halide Exchange on a Single Perovskite Nanocrystal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 2548 ~ 2553
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202013386	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 Zhang Zhujun, Nagashima Hiroki, Tachikawa Takashi	4. 巻 59
2. 論文標題 Ultra Narrow Depletion Layers in a Hematite Mesocrystal Based Photoanode for Boosting Multihole Water Oxidation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 9047 ~ 9054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202001919	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 Watase Tatsuya, Sohmiya Minoru, Zhang Zhujun, Kobori Yasuhiro, Tachikawa Takashi	4. 巻 124
2. 論文標題 Unraveling Hidden Correlations between Molecular Diffusivity and Reactivity in Ruthenium Complex-Modified Mesoporous Silica	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 21502 ~ 21511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c06190	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 Haraguchi Naoya, Okunaga Tomoki, Shimoyama Yuto, Ogiwara Naoki, Kikkawa Soichi, Yamazoe Seiji, Inada Miki, Tachikawa Takashi, Uchida Sayaka	4. 巻 in press
2. 論文標題 Formation of Mixed Valence Luminescent Silver Clusters via Cation Coupled Electron Transfer in a Redox Active Ionic Crystal Based on a Dawson type Polyoxometalate with Closed Pores	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Journal of Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ejic.202100101	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 Manabu Sakurai, Yasuhiro Kobori, Takashi Tachikawa	4. 巻 123
2. 論文標題 Structural Dynamics of Lipid Bilayer Membranes Explored by Magnetic Field Effect Based Fluorescence Microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 10896 ~ 10902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b09782	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 Seigo Mizutani, Izuru Karimata, Longjie An, Takamasa Sato, Yasuhiro Kobori, Hiroshi Onishi, Takashi Tachikawa	4. 巻 123
2. 論文標題 Charge Carrier Dynamics in Sr-Doped NaTaO ₃ Photocatalysts Revealed by Deep Ultraviolet Single-Particle Microspectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 12592 ~ 12598
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b01929	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 Zhujun Zhang, Izuru Karimata, Hiroki Nagashima, Shunsuke Muto, Koji Ohara, Kunihisa Sugimoto, Takashi Tachikawa	4. 巻 10
2. 論文標題 Interfacial oxygen vacancies yielding long-lived holes in hematite mesocrystal-based photoanodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4832/1 ~ 4832/12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-12581-z	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 Yuta Murakami, Takashi Kamegawa, Yasuhiro Kobori, Takashi Tachikawa	4. 巻 12
2. 論文標題 TiO ₂ superstructures with oriented nanopores: a strategy for efficient and selective photocatalysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 6420 ~ 6428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9nr10435f	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 Yasuhiro Kobori, Takumi Ako, Shinya Oyama, Takashi Tachikawa, Kazuhiro Marumoto	4. 巻 123
2. 論文標題 Transient Electron Spin Polarization Imaging of Heterogeneous Charge-Separation Geometries at Bulk-Heterojunction Interfaces in Organic Solar Cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 1347 ~ 13481
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b02672	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 Karimata Izuru, Ohta Kaoru, Kobori Yasuhiro, Tachikawa Takashi	4. 巻 10
2. 論文標題 Several Orders of Magnitude Difference in Charge-Transfer Kinetics Induced by Localized Trapped Charges on Mixed-Halide Perovskites	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 37057 ~ 37066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.8b13346	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 Kimura Yuki, Karimata Izuru, Kobori Yasuhiro, Tachikawa Takashi	4. 巻 5
2. 論文標題 Mechanistic Insights into Photochemical Reactions on CH ₃ NH ₃ PbBr ₃ Perovskite Nanoparticles from Single-Particle Photoluminescence Spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemNanoMat	6. 最初と最後の頁 340 ~ 345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cnma.201800569	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 Uchida Sayaka, Okunaga Tomoki, Harada Yuki, Magira Shotaro, Noda Yasuto, Mizuno Takashi, Tachikawa Takashi	4. 巻 11
2. 論文標題 Rapid formation of small mixed-valence luminescent silver clusters via cation-coupled electron-transfer in a redox-active porous ionic crystal based on dodecamolybdophosphate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 5460 ~ 5466
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9NR00103D	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 Nagai Sayaka, Yamashita Maho, Tachikawa Takashi, Ubukata Takashi, Asami Masatoshi, Ito Suguru	4. 巻 7
2. 論文標題 Efficient and versatile mechanochromic luminescence of phenanthroimidazolylbenzothiadiazoles: tricolor switching and directional control over the chromism	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 4988 ~ 4998
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9TC00157C	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19件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Takashi Tachikawa
2. 発表標題 Development of Mesocrystalline Photoanodes for Efficient Water Splitting
3. 学会等名 International Conference on Photocatalysis and Photoenergy 2019 (ICoPP 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 立川貴士
2. 発表標題 光エネルギー変換反応の単一粒子・単一分子発光イメージング
3. 学会等名 東京工業大学講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Tachikawa
2. 発表標題 Development of Mesocrystal-Based Photoanodes for Efficient Solar Water Splitting
3. 学会等名 Indo-Japan workshop Frontiers in Molecular Spectroscopy: From Fundamentals to Applications in Chemistry and Biology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 立川貴士
2. 発表標題 刺激応答構造変化の1粒子発光観測
3. 学会等名 日本化学会 第100春季年会(2020) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Tachikawa
2. 発表標題 Single-Particle Photoluminescence Imaging of Organolead Mixed-Halide Perovskites
3. 学会等名 The 2nd International Symposium on Soft Crystals (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 立川貴士
2. 発表標題 ヘマタイトメソ結晶光電極の開発
3. 学会等名 第38回 固体・表面光化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 張主軍
2. 発表標題 Hematite mesocrystals with abundant interfacial oxygen vacancies for efficient solar water splitting
3. 学会等名 2019年光化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻井学
2. 発表標題 Fluorescence imaging of magnetic field effects on organic long persistent luminescence
3. 学会等名 2019年光化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡瀬達也
2. 発表標題 Single-Particle Emission Observation of Ruthenium Dye-Adsorbed Mesoporous Silica
3. 学会等名 2019年光化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 狩俣出
2. 発表標題 イオンダイナミクスが誘起する有機鉛ペロブスカイトの単一粒子発光スイッチング
3. 学会等名 2019年光化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下真帆
2. 発表標題 メカノクロミック発光性色素における刺激応答構造変化の蛍光顕微鏡観測
3. 学会等名 2019年光化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本萌里
2. 発表標題 ハロゲン混合型有機無機ペロブスカイトにおける光誘起相分離
3. 学会等名 2019年光化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 立川貴士
2. 発表標題 光エネルギー変換プロセスの単一分子・単一粒子発光観測
3. 学会等名 日本分光学会 関西支部 平成30年度 第2回講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Tachikawa
2. 発表標題 Single-molecule, single-particle study toward development of efficient photocatalysts
3. 学会等名 Indo-Japan mini-workshop Frontiers in Molecular Spectroscopy: From Fundamentals to Applications in Chemistry and Biology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Tachikawa
2. 発表標題 Development of Hierarchical Superstructures for Efficient Photocatalysis
3. 学会等名 2018 Taiwan-Japan Bilateral Symposium on Green Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立川貴士
2. 発表標題 メソ結晶光触媒の開発と単一分子・単一粒子研究
3. 学会等名 IEEE EPSイブニングミーティング (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Tachikawa
2. 発表標題 Correlated dynamics of photogenerated charges and ions in organolead mixed-halide perovskites
3. 学会等名 27th IUPAC International Symposium on Photochemistry (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立川貴士
2. 発表標題 混合ハロゲン化物ペロブスカイトにおける電荷キャリアダイナミクス
3. 学会等名 2018年光化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Tachikawa
2. 発表標題 Development of Hierarchical Mesocrystals for Efficient Photocatalysis
3. 学会等名 10th Asian Photochemistry Conference (APC2018) (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
研究 分 担 者	坂本 雅典 (Sakamoto Masanori) (60419463)	京都大学・化学研究所・准教授 (14301)	

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