

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B））

研究期間：2019～2022

課題番号：19KK0134

研究課題名（和文）単一粒子反応による包括的ナノ材料形成の国際共同研究拠点

研究課題名（英文）International Joint Research Initiative for Single Particle Nanofabrication

研究代表者

関 修平（SEKI, Shu）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：30273709

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、「1つの原子反応」による「1桁nm領域のナノ材料」を目標とし、京都大学（KU）・量研機構（QST）・ドイツ（GSI）・インド（IUAC）の協働によって、Single Particle Triggered Linear Polymerization: STLiP法によるナノ空間内自在分子重合反応法を確立した。本手法によって得られたナノ構造は、1）完全な配列制御・密度制御を行ってナノ構造化機能表面を形成（KU-QST-IUAC-GSI）、2）超高感度センシングとナノ医療応用（KU-QST）、3）多機能複合電子素子展開（KU-QST-IUAC）、の各機能材料として結実した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノ構造形成におけるさまざまな手法が展開され、特に電子素子形成に決定的な役割を果たす中、その微細構造化はようやく2次元の束縛を離れ、3次元構造へと展開しようとしている。数nm領域の最先端材料微細化において、ボトムアップ型規則性均一ナノ構造形成の主流であるリソグラフィー技術が決して到達できなかった、アスペクト比：数10をはるかに凌駕する100以上に達する直立型ナノ構造を、本研究のSTLiP法がきわめて簡便に達成できることを示した。ごくありふれた有機分子性物質を選択し、その機能を生かしたナノ材料化が可能であることは、従前のナノ材料研究における学術的・社会的常識を覆す発見である。

研究成果の概要（英文）：Present study has established successfully the Single Particle Triggered Linear Polymerization (STLiP) method which allows us to fabricate uniform 1D nanostructures via polymerization/crosslinking reactions confined into a nm-scaled cylindrical area of solid state ubiquitous organic molecules. The dimensions of the obtained nanostructures were perfectly under control in their sizes, orientation, and number density. Standing forms of the nanowires with extremely high aspect ratio exceeding ~100 on a substrate had been unexplored by the conventional nano-fabrication methods. Achieving the standing form of organic nanowires in collaborative works of KU, IUAC, GSI, and QST has been successfully implemented by 1) functional surfaces filled with extraordinary high aspect/density of the oriented nanowires, 2) nanomedicines as well as sensing platforms reflecting its gigantic surface area, and 3) Electrical current control along the 1D nanowires.

研究分野：物性物理化学

キーワード：ナノワイヤ 粒子線 イオンビーム 伝導性 ラマン センシング ナノ医療 直立

1. 研究開始当初の背景

W. C. Röntgen による X 線の発見以来、化学反応誘起源としての電離放射線は、物質の電離過程の化学結合非選択性・空間一様性に裏打ちされた高い定量性を、その最大の特色としてきた。一方で大きな質量と運動エネルギーを有する重粒子線は、物質中でのエネルギー散逸過程における高い指向性と空間不均一性により、電離放射線による化学反応研究を根本から変革する様相を見せている。これらは、医療分野における放射線治療や分析手法の発展として結実を見せており、電離放射線のエネルギー付与における基礎過程が、複雑系である生命システム、ことに人を対象にした医療に直接応用されるという稀有な例でもある。一方で、福島原子力発電所の事故以来、国内においては、エネルギー分野のみならず、電離放射線に対する負のイメージの一般化、ならびに研究対象としての萎縮が進みつつあることも否めない。放射線研究における黎明期に、量子力学的描像のほとんどすべてが放射線によって確立されたように、電離放射線の物理化学反応誘起源としての価値を、均一性から不均一性への転換に伴って新たに見直すことを意図し、本研究では国際的な放射線不均一化学反応研究拠点の構築を目指した。

高い定量性を担保する電離放射線の均一エネルギー付与過程は、物質の解析・定量のために欠かせない概念であるが、反応の空間的な集約が不可欠な材料の直接形成反応には全く適さない。一方で、重粒子線による不均一反応は、エネルギー収支の観点からも、バルク固体内反応にその活路を見出す余地はないが、超微細空間内反応の取り出し・ナノマテリアルの創成には最適でもある。本研究では、重粒子線の有機物質への単純照射という極めて簡便な手法で、粒子の飛跡に沿った一次元領域に対応する一次元ナノ構造体を普遍的に創成するという研究を主軸として展開した。

2. 研究の目的

従来、高分子を対象に展開してきた単一粒子加工法 (Single Particle Nano-fabrication Technique: SPNT) をベースにし、その適用範囲を有機低分子まで拡張した単一粒子誘起固相重合法 (Single-particle Triggered Linear Polymerization: STLiP) によるナノ空間内自在分子重合反応法を、京都大学 (KU)・量研機構 (QST)・ドイツ (GSI)・インド (IUAC) の協働によって確立する。本手法は大型加速器が生成する MeV ~ GeV オーダーのイオンビームを主に用いるため、国内拠点に KU・QST、国外拠点に GSI・IUAC を設定し、「単一粒子反応による包括的ナノ材料形成の国際共同研究拠点」として物質設計からビーム制御までを一貫して検討する体制を構築する。また、本手法によって得られたナノ構造は、1) 完全な配列制御・密度制御を行ってナノ構造化機能表面を形成 (KU-QST-IUAC-GSI)、2) 超高感度センシングとナノ医療応用 (KU-QST)、3) 多機能複合電子素子展開 (KU-QST-IUAC) の各機能材料として結実させる。








3. 研究の方法

加速器施設 QST・GSI・IUAC による各種高エネルギーイオンビームを系統的に用い、有機ナノ材料創成法として普遍化する。粒子線によって誘起される局所化学反応の解析は、マイクロ波・赤外・可視・光電子分光法を複合的に用いて行い、反応効率の最適化のための有機分子設計に回帰させる。具体的には、a) 物質設計、b) 有機薄膜へのイオンビーム照射、c) エネルギー付与過程の予測と定量、d) ナノ材料単離、e) 複合機能化、を一連の循環とし、各研究項目で設定したナノ材料機能に速やかに反映させる。研究項目 1) では、イオンビーム条件とナノワイヤの構造パラメータの間の相関を AFM や SEM などの顕微鏡手法による直接観察から導き出し、研究項目 2)・3) では、我々の研究グループが独自に構築してきた分光学的手法およびキャリア輸送評価測定をもとに有機デバイスとしての可能性を模索した。1)~3) の各研究項目はいずれも、基礎から応用に至る一連の循環最適化を KU 主導で包括的に実施した。

4. 研究成果

研究項目 1) における次元制御、とりわけ三次元配置を達成するには、有機ナノワイヤの力学的剛直性が鍵となる。剛直性がナノワイヤの半径に、さらにそのナノワイヤ径と放射線化学反応効率 G 値に相関があると仮定し、スピロピフルオレン (SBF) 誘導体の置換基効果を検討した。高エネルギー重粒子線によって化学結合の直接乖離に伴う中性ラジカル生成が誘起されやすい置換基として、臭素原子およびエチニル基を採用し、SBF への置換数に対するナノワイヤ径 (r) を測定したところ、いずれの置換体においても置換数の増加に伴い r の増加を確認した (Table. 1)。重粒子線による局所高密度反応下においても解離性電子付着反応は有意に進行し、芳香族分子に対するハロゲン置換基の導入が、局所重合反応活性制御の重要な因子の一つであると言える。芳香族共役分子骨格の富化に伴う十分な重合骨格剛直性の確保が、ナノワイヤ構造体の構造安定化・強化に直結するとの仮説の下、シングルナノサイズの構造自立とその三次元配置に実現

Table 1. Summary of density ρ , calculated linear energy transfer (LET), observed nanowire radii r , and estimated crosslinking reaction efficiencies $G(x)$ for each compound.

	1				
	2				
	5				
	Compounds	1	2	3	4
	$\rho / \text{g mol}^{-1}$	1.25	1.48	1.63	1.84
	LET / eV nm ⁻¹	11800	12000	12300	12400
	r / nm	4.2 ± 0.3	4.4 ± 0.4	4.7 ± 0.3	5.2 ± 0.3
	$G(x) / (100 \text{ eV})^{-1}$	29	37	44	59
	Compounds	5	6	7	
	$\rho / \text{g mol}^{-1}$	1.29	1.29	1.31	
	LET / eV nm ⁻¹	11700	11700	11800	
	r / nm	5.2 ± 0.4	5.7 ± 0.3	7.1 ± 0.5	
	$G(x) / (100 \text{ eV})^{-1}$	47	57	87	

を目指し、従来の液相単離プロセス（溶媒現像）による構造崩壊を本質的に回避できる新たな現像手法の開発に着手した。溶媒現像では液体の表面張力によるナノワイヤ同士または支持基板との接触が、自発的な凝集と自立構造崩壊の主要因と予測される。本項では、出発有機分子が有意の高い蒸気圧を示す低分子であることに着目し、その昇華性を利用した新しい現像・ナノ構造単離方法を確立した。Fig. 1a に、反応活性基を有する昇華性有機分子を真空蒸着法により薄膜化しイオンビームを照射した後、真空加熱することで単離されたナノワイヤの像とそのプロセスを示す。溶媒単離下では容易に凝集構造が見られ、すべて基板上に倒れて観測されるのに対し、昇華現像ではイオンビームの一次元配向を維持した垂直配向アレイ構造が創製された。このアスペクト比が 100 以上

に達するナノ構造体の三次元配置は、従来、有機材料では形成しえなかった構造である。また、2次元薄膜に対して水平にイオンビームを照射することで、面内配向アレイ構造の作製にも成功した（Fig. 1b）。原理的にナノワイヤ長の限界（重粒子線の飛程による限界）に近い数 10 μm に対する長大ナノワイヤが基板水平方向に完全配向し、局所凝集も見られない。次元性を完全にコントロールし、特に本手法におけるナノワイヤ長や本数（面内密度）といった構造パラメータを自在に決定できる点を含め、すべて従来法では形成できないナノ構造形成の事例である。

研究項目 2) では、ナノワイヤ基板をセンシング場とする超高感度光センサーとしての可能性を検討した。ここでは、蛍光センサーとラマン分光センサーとしての展開を示す。前者について、代表的な色素化合物であるポルフィリンのエチニル置換誘導体をベースとしたナノワイヤを作製し、その界面で一重項酸素を生成 - SOSG による検出を行った（Fig. 2）。有機分子としてポルフィリンを用い、このナノワイヤの示す Soret 帯：波長 420 nm にて励起することで一重項励起状態、続けて項間交差により三重項状態に遷移させる。莫大なナノ構造暴露表面において、基底

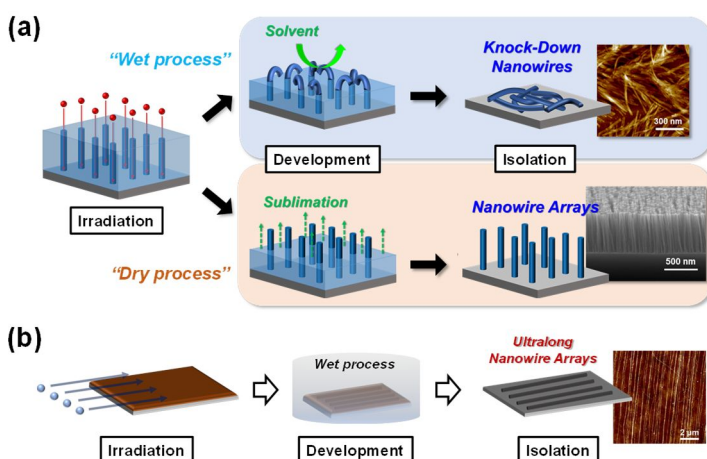


Fig. 1. Schematic illustration of organic nanowire fabrication method via irradiation of high-energy charged particles: STLIP protocol. (a) The conventional nanowire fabrication uses two types of development methods (wet- and/or dry-process). These development methods form separate nanowire assemblies, corresponding to lying nanowires and vertically oriented nanowires, respectively. (b) Ultralong nanowire arrays were prepared by in-plane irradiation to substrates.



Fig. 2. (a) Schematic illustration of porphyrin-sensitized singlet oxygen generation and its reaction with SOSG. (b) fluorescence intensity ratio I/I_0 at 540 nm ($\lambda_{\text{em}} = 540 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{ex}} = 509 \text{ nm}$) as a function of photoirradiation time at 420 nm observed for SOSG alone (green, control) and SOSG with porphyrin nanowires fabricated by the irradiation of **6** with 490 MeV $^{192}\text{Os}^{30+}$ particles at the fluence of $1.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (blue) and $1.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (red).

三重項酸素へのエネルギー移動を介し、一重項酸素を生成させた。Fig. 2a は、生成する一重項酸素の、典型的な検出材である SOSG による評価結果である。ナノワイヤ存在下では、励起光照射時間に伴う発光強度の顕著な増加が確認され、ナノ構造の巨大比表面積が、この鍵過程であることを示している (Fig. 2b)。加えて、我々はこのナノワイヤ基板に金属ナノ粒子を複合的に組み合わせたハイブリッド構造を構築し、表面プラズモンがもたらす蛍光増感センサーの検討も行った。表面プラズモンによって強く励起された電場は、ポルフィリンナノワイヤの励起・蛍光強度の増強をもたらすことが確認された。このような有機ナノワイヤ-金属ハイブリッドセンサーはセンシング分野、とりわけ医療分野への応用が十分に期待できる。

これまでセンサー材料として金属を用いない、いわゆるメタルフリーセンサーの開発が生体領域にて急速に進んでいる。in vitro 試験では無機、有機材料問わず数多くのセンシング材料の開発が行われてきたのに対して、in vivo 実験への運用は比にならない精度や安全性が求められることから炭素材料、有機材料に注目が集まっている。2008 年にノーベル化学賞を受賞した下村による緑色蛍光タンパク質 (GFP) の発見により蛍光センサーは格段の進歩を遂げたが、検出対象と選択的相互作用の必要性や、微小領域の局所センシングの難しなどが現在でも課題となっている。これらを克服するセンシング手法としてラマン分光法を用いたラマンセンサーが注目されている。ラマン分光は分子の振動や回転運動を反映するだけでなく、サンプルの状態 (気体、液体、固体) によらず系中での配向や挙動を捉えることのできる革新的な手法である一方で、その微弱なシグナルを十分に検出するための装置が複雑になりやすい。そこで感度の飛躍的な向上をもたらすセンサーとして、表面増強ラマン散乱 (SERS) を用いたセンサー設計が主流となりつつある。SERS は (1) 物理的因子: 金属の表面プラズモンによる電場増強, (2) 化学的因子: ターゲットと反応場との電荷移動相互作用, に起因すると考えられており、そのシグナル増強度が 10^{10} に達することもあるため、単一分子分光にすら展開可能である。

本研究では、高アスペクト比による巨大比表面積を有する垂直配向ナノワイヤアレイ (ONA) 基板をセンシング場としたメタルフリーラマンセンサーとしての展開を進めた。STLiP 法でフラーレン C_{60} ベース ONA 基板を作製し、分析ターゲットとして典型的な R6G をラマン分光測定によりスペクトルを取得した (Fig. 3)。Fig. 3a で示す各種基板に対して R6G を吸着させた場合、ONA 基板のみ著しいピーク強度の増強が確認できた (Fig. 3b)。その後の、詳細な検証により、R6G と C_{60} ナノワイヤの間で電子移動を伴う共鳴現象であると結論付けた。また、 C_{60} 以外のナノワイヤ原料では、シグナル増強度が大きく異なることからそれらのエネルギー準位が関連しているのは明らかである。ONA 基板の巨大比表面積をもって、界面反応を促進することで金属 SERS に匹敵する増強度を達成できたことから、今後は ONA 基板を用いた汎用センシング手法へと昇華することを目指す。

本研究項目 3) では、有機ナノワイヤを高指向性キャリア伝導パスとみなし、その電気伝導性評価を行った。半導体ナノワイヤは、ナノ空間における幾何学的一次元性を鍵とする新たな材料として注目されている。特に、一次元方向に制限された構造は、その軸方向に沿った伝導パスを担うとみなせ、昨今、ナノテクノロジーの発展とともにデバイスの微小化が進む中、電子や熱といったキャリアの輸送性を選択的かつ一方に固定できる一次元ナノ材料のデバイス応用が今後

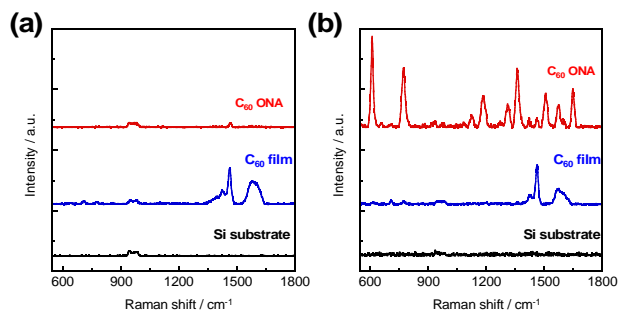


Fig. 3. Raman spectra of R6G on C_{60} ONA substrate (red), C_{60} film (blue), and Si substrate (black), respectively, (a) before and (b) after immersion in R6G solution (10 μ M). Both C_{60} nanowire length and film thickness: 100 nm. Irradiation conditions: 450 MeV $^{129}\text{Xe}^{23+}$ at $5.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Raman spectroscopic condition were laser wavelength: 532 nm, laser power: 0.6 mW, and integration time: 1 s.

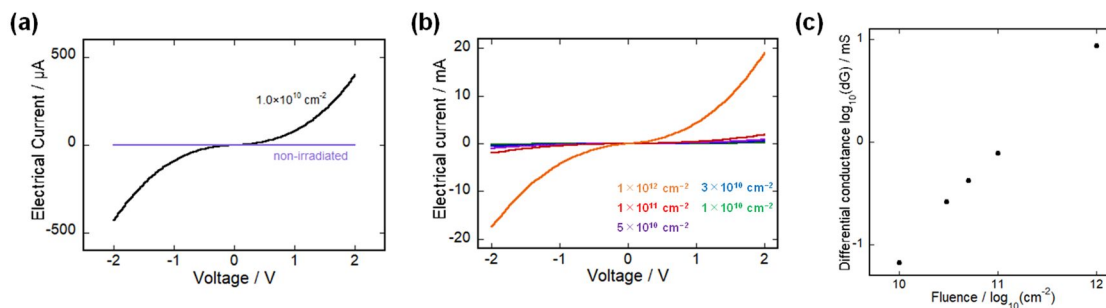


Fig. 4. Electrical conductivity profiles of irradiated C_{60} films at the various fluence (vertical device). I - V characteristic of (a) non-irradiated films and irradiated one at the fluence of $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, and (b) irradiated films at the fluence of $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ - $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. (c) The plots of differential conductance at 1 V versus every fluence.

期待される。STLiP法で作製した C_{60} 垂直配向ナノワイヤアレイに対して、簡易の電気伝導測定素子を作製し I - V 測定を行ったところ、イオンビームの照射に伴い、絶縁体である C_{60} が電気伝導性の獲得を示した (Fig. 4a)。加えて、イオンビーム照射面内密度、つまりナノワイヤの面内本数の増加に伴い、電気伝導性の比例的増加関係が見られた。これは一般的にキャリア注入されていない有機化合物の電気伝導度は非常に低いため、これらの結果から、イオンビームによって薄膜内で形成された一次元ナノワイヤがキャリアの伝導パスを果たしていると考えられる。また、STLiP法の利点の一つとして、

照射膜を積層化することで異種材料が連結したヘテロ接合ナノワイヤが得られることが挙げられる。このようなヘテロ接合系は、最も基本的な素子システムの一つであり、実用上ダイオードに適用される。そこで、上記同様の支持基板電極上にTiOPcと C_{60} を順に600 nm真空蒸着することで積層膜を作製し、イオンビームを照射し、電気特性を測定した (Fig. 5)。

ここで、TiOPcと C_{60} はいずれも典型的な有機半導体で、それぞれ n 型、 p 型である。Fig. 5bに示すように、電流が一定方向にのみ流れる整流作用が観測されたことから、連結部における p - n 接合界面の形成が確認された。また、 C_{60} 水平配向アレイナノワイヤでは簡易な電界効果トランジスタ (FET) 素子を作製し電気特性を評価したところ、そのナノワイヤ一本の抵抗率はまさしく半導体領域のものであり、シリコン (Si) の4桁程度小さく、ゲルマニウム (Ge) と同程度であった。STLiP法優位性を生かし、半導体性を最大限に引き出せる分子性物質を自由に選択し、ナノ構造化・素子形成が可能であることを、本手法の普遍性獲得における本研究成果の今後の展開の鍵としたい。

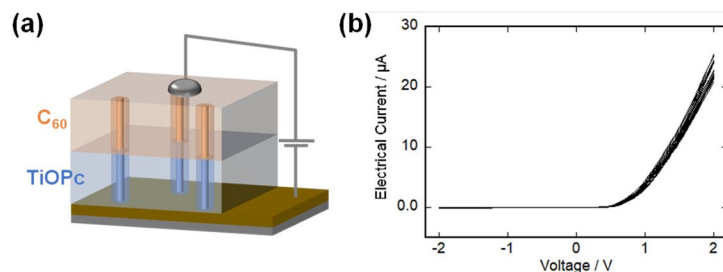


Fig. 5. Electrical conductivity in pn junction nanowire devices. (a) Schematic illustration of the irradiated bilayer (C_{60} -TiOPc) device. (b) I - V characteristic of the bilayer film at the fluence of $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$.

主な発表論文等

S. Sakaguchi, Koshi Kamiya, T. Sakurai, S. Seki, “Interactions of Single Particle with Organic Matters: A Facile Bottom-Up Approach to Low Dimensional Nanostructures” *Quantum Beam Sci.*, **4**, 7 (2020).

T. Sakurai, S. Sakaguchi, Yuki Takeshita, Kazuto Kayama, Akifumi Horio, Masaki Sugimoto, Tetsuya Yamaki, Atsuya Chiba, Yuichi Saitoh, Lakshmi BVS Garimella, Devesh Kumar Avasthi, S. Seki, “Porphyrin Nanowire Bundles for Efficient Photoconductivity, Photoemission, and Generation of Singlet Oxygens toward Photodynamic Therapy” *ACS Appl. Nano Mater.*, **3**, 6043-6053 (2020).

S. Sakaguchi, T. Sakurai, A. Idesaki, H. Koshikawa, Masaki Sugimoto, S. Seki, “Highly efficient solid-state intra-track polymerization of ethynyl-substituted spirobifluorenes triggered by swift heavy ion irradiations” *J. Photopolym. Sci. Technol.* **33**, 91-96 (2020).

M. Nobuoka, K. Kamiya, S. Sakaguchi, A. Idesaki, T. Yamaki, T. Sakurai, S. Seki, “Oriented Nanowire Arrays with Phthalocyanine – C_{60} Multi-Heterojunctions” *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **34**, 167-174 (2021).

K. Kamiya, K. Kayama, M. Nobuoka, S. Sakaguchi, T. Sakurai, M. Kawata, Y. Tsutsui, M. Suda, A. Idesaki, H. Koshikawa, M. Sugimoto, G. B. V. S. Lakshmi, D. K. Avasthi, S. Seki, “Ubiquitous Organic Molecule-based Free-standing Nanowires with Ultra-high Aspect Ratios” *Nat. Commun.*, **12**, 4025-4035 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Koshi Kamiya, Kazuto Kayama, Masaki Nobuoka, Shugo Sakaguchi, Tsuneaki Sakurai, Yusuke Tsutsui, Masayuki Suda, Minoru Kawata, Akira Idesaki, Hiroshi Koshikawa, Masaki Sugimoto, G. B. V. S. Lakshmi, D. K. Avasthi, Shu Seki	4. 巻 12
2. 論文標題 Ubiquitous organic molecule-based free-standing nanowires with ultra-high aspect ratios	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-24335-x	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 Masaki Nobuoka, Koshi Kamiya, Shugo Sakaguchi, Akira Idesaki, Tetsuya Yamaki, Tsuneaki Sakurai, Shu Seki	4. 巻 34
2. 論文標題 Oriented nanowire arrays with phthalocyanine - C60 multi-heterojunctions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Photopolym. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 167-174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.34.167	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 Tsuneaki Sakurai, Shugo Sakaguchi, Yuki Takeshita, Kazuto Kayama, Akifumi Horio, Masaki Sugimoto, Tetsuya Yamaki, Atsuya Chiba, Yuichi Saitoh, G.B.V.S. Lakshmi, Devesh Kumar Avasthi, and Shu Seki	4. 巻 3
2. 論文標題 Porphyrin Nanowires Developed by High-Energy Single Particle-Triggered Intra-Track Polymerization: Design, Property, and Conjugation with Metal Nanoparticles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Appl. Nano. Mater.	6. 最初と最後の頁 6043-6053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.0c01242	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 Shugo Sakaguchi, Tsuneaki Sakurai, Akira Idesaki, Hiroshi Koshikawa, Masaki Sugimoto, and Shu Seki	4. 巻 33
2. 論文標題 Highly Efficient Solid-State Intra-Track Polymerization of Ethynyl-Substituted Spirobifluorenes Triggered by Swift Heavy Ion Irradiations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Photopolym. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 91-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2494/photopolymer.33.91	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 Shugo Sakaguchi 1, Koshi Kamiya 1, Tsuneaki Sakurai 1, and Shu Seki	4. 巻 4
2. 論文標題 Interactions of Single Particle with Organic Matters: A Facile Bottom-Up Approach to Low Dimensional Nanostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quantum Beam Sci.	6. 最初と最後の頁 7-1-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/qubs4010007	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 Shugo Sakaguchi, Koshi Kamiya, Tsuneaki Sakurai, Shu Seki	4. 巻 4
2. 論文標題 Interactions of Single Particle with Organic Matters: A Facile Bottom-Up Approach to Low Dimensional Nanostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quantum Beam Science	6. 最初と最後の頁 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/qubs4010007	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0件

〔図書〕 計1件

1. 著者名 関 修平・坂口周悟・神谷昂志	4. 発行年 2021年
2. 出版社 学振第132委員会	5. 総ページ数 593
3. 書名 電子・イオンビーム ハンドブック第4版	

〔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	櫻井 庸明 (Sakurai Tsuneaki) (50632907)	京都工芸繊維大学・分子化学系・講師 (14303)	

6. 研究組織（つづき）

	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	筒井 祐介 (Tsutsui Yusuke) (50845592)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	
研究分担者	崔 旭鎮 (Wookjin Choi) (70916147)	京都大学・工学研究科・特定助教 (14301)	

	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
研究協力者	坂口 周悟 (Sakaguchi Shugo)		
研究協力者	信岡 正樹 (Nobuoka Masaki)		
研究協力者	神谷 昂志 (Kamiya Koshi)		
研究協力者	河田 実里 (Kawata Minori)		
研究協力者	香山 一登 (Kayama Kazuto)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	堀尾 明史 (Horio Akifumi)		

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			
インド	IUAC	Amity University	Jawaharlal Nehru University	他1機関
ドイツ	GSI Darmstadt			