

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82108
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2020～2022
 課題番号：20K05590
 研究課題名(和文) Hierarchical Nanoporous Fullerene Crystal Design for Higher Efficiency VOC Sensors
 研究課題名(英文) Hierarchical Nanoporous Fullerene Crystal Design for Higher Efficiency VOC Sensors
 研究代表者
 Shrestha L. Kumar (SHRESTHA, Lok Kumar)
 国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主幹研究員
 研究者番号：90588922
 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)：我々は、液液界面沈殿法により、新規なトウモロコシの皮のようなフラーレンC60結晶(CHFC)、分子が薄い窒素ドーブ2Dフラーフェン、フラーレンロゼットの作製に成功した。階層的多孔質構造と高い表面積、および窒素ドーピングにより、これらの材料は優れた水晶振動子マイクロバランス(QCM)センシング結果を示しました。これらの新規材料は、芳香族蒸気に比べて酸蒸気に敏感です。私たちの結果は、極薄二次元(2D)ナノ多孔質材料がセンシング用途において感度の向上と高い空間分解能を提供し、ゲスト分子の選択的識別に不可欠であることを示しています。

研究成果の学術的意義や社会的意義
 フラーレンベースのナノ多孔質材料、特に極薄の2Dナノ多孔質材料は、センシング用途において感度の向上と高い空間分解能を提供するため、ゲスト分子の選択的識別にとって重要となり、安全で持続可能な社会の資産となります。

研究成果の概要(英文)：We have successfully fabricated novel corn-husk-shaped fullerene C60 crystals (CHFCs), molecularly thin nitrogen-doped 2D fullerene and fullerene rosettes through the liquid-liquid interfacial precipitation method. Due to the hierarchically porous structures and high surface area and nitrogen doping these materials showed excellent quartz crystal microbalance (QCM) sensing results. The CHFCs sensitive to acetic acid vapors. While fullerene is sensitive to formic acid over acetic acid in the vapor. Fullerene rosettes are selective to acids against basic guests (formic acid/pyridine > 30) or aromatic guests (formic acid/toluene > 110), the fullerene rosette based QCM sensor also showed superior performances. Our results show ultrathin two-dimensional (2D) nanoporous materials offer enhanced sensitivity and high spatial resolution in sensing applications making them important for the selective discrimination of guest molecules.

研究分野：Supramolecular self-assembly

キーワード：Fullerene Self-assembly Microporous Mesoporous Vapor sensing

1 . 研究開始当初の背景

Air pollution is one of the most widespread and inevitable pollutions of the recently developed society. Pollutants, such as volatile organic compounds (VOCs) and respirable particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) diffuse in short/long distances and contaminate environment. Polluted air has both acute and chronic effects on human health. It ranges from minor upper respiratory irritation to chronic respiratory, lungs and heart disease. Both indoor and ambient air is contaminated with toxic VOCs such as toluene due to the use of common household products and smokes. In order to keep environment or the workplace safe and contamination free, it is necessary to fabricate novel functional materials that can be used for the high efficiency VOC sensors. Various types of sensors that can detect gaseous species by potentiometric, mixed potential, or amperometry signals have conventionally been developed. However, piezoelectric devices such as QCM or quartz crystal microbalance with dissipation (QCM-D) are well-known techniques used in vapor sensing technology. It was found that sensing materials, its structure-property relation and stability of the materials play crucial role in sensing both in selectivity and sensitivity. The basic principle of the sensing relies on the adsorption and physicochemical interactions of the analyte with sensor material. Adsorption can be enhanced with increasing the porosity of the material and intrinsic properties of the material contribute to the diffusion kinetics through the host-guest interactions. Although commercial activated carbons exhibit high surface area (>500 m²/g), due to mixture of sp²/sp³ bonded carbons they poorly interact with aromatic vapors limiting the sensor performance. On the other hand, π -electron rich material such as fullerenes can have strong π - π interactions with the aromatic vapors, but they suffer from poor surface textural properties (surface area and porosity). However, it is yet a key challenge to fabricate hierarchical nanoporous structure in π -electron rich carbon material such as fullerenes.

2 . 研究の目的

Production of hierarchically porous fullerene crystals comprising micro- and mesoporous architectures for high efficiency VOC sensor materials, which allows higher QCM sensor response due to easy and free diffusion of aromatic vapors into the nanopores utilizing π - π interactions between gas phase and sp² bonded π -electron rich carbon frameworks.

3 . 研究の方法

Fullerene crystals with different morphology and porous structures were synthesized using a solution-based strategy based on bottom-up nanotechnology called liquid-liquid interfacial precipitation (LLIP) method. Both the dynamic LLIP and static LLIP method were employed. For example, corn-husk shape fullerene crystals (CHFCs) were synthesized by dynamic LLIP (DLLIP) method. Typically, a saturated solution of fullerene C₆₀ was prepared by dissolving excess pC₆₀ powder (60 mg) in mesitylene (50 mL). Undissolved excessive fullerene was removed by the filtration. Using the DLLIP method, the self-assembled fullerene C₆₀ crystals were synthesized. Typically, isopropyl alcohol (IPA: 5 mL) was quickly added into the freshly prepared saturated solution of C₆₀ in mesitylene (1 mL: 0.999 mg/mL), immediately followed by a vigorous handshaking for about 3 s. The mixture was incubated at 25 °C for 15 min avoiding any external mechanical disturbances. The CHFCs precipitates were washed with IPA (5 mL) three times to remove the organic solvent and finally separated from the mixture by centrifugation and dried in a vacuum oven at 70 °C for 3 h.

Similarly, 2D fullerene (C₆₀ or C₇₀)-EDA films and fullerene films were prepared by the liquid-liquid interfacial self-assembly method under ambient conditions. Pristine C₆₀ (or C₇₀) powder was dissolved in m-xylene solution assisted by applying ultrasonication for 1 h to obtain C₆₀ or C₇₀ solution (1 mg/mL). EDA (2 mL), fullerene solution (1 mg/mL: 3 mL), and ultrapure water (3 mL) were added sequentially to a clean, dry 13.5 mL glass bottle followed by vigorous agitation by shaking for about 1 minute and the resulting mixture was stored at room temperature (25 °C) for 2 h to obtain a microemulsion in the upper organic phase of the mixture, which is stabilized by the thin fullerene-EDA films. Excess EDA and fullerene in the lower aqueous phase were removed using a syringe followed by sequential washing with pure water (5 mL × 3) and freeze-drying overnight in a lyophilizer yielding dried fullerene-EDA films. Fullerene films were obtained by the thermal annealing of fullerene-EDA films in a tubular furnace at 700 °C under a

constant flow of nitrogen gas (120 cc/min). The temperature ramp was 5°C/min with a hold time of 2 h. To prepare macroscopically wide and large area fullerene-EDA film, an aliquot of the microemulsion (3 µL) was slowly transferred to a liquid-liquid interface between water and m-xylene, where the ultrathin fullerene-EDA film reassembles to a wide-area multilayered film. The large area film could be observed visually and could be transferred easily onto a solid substrate by the scooping method.

Finally, for the synthesis of fullerene rosettes, fullerene C₆₀ solutions with desired concentrations (0.5 mg/mL or 1.0 mg/mL) were prepared by dissolving the required amount of pristine C₆₀ powder via sonication in m-xylene. Undissolved or excessive fullerene was removed by filtration when necessary. Separately, melamine in ethylenediamine solution (10.0 mg/mL) was also prepared via dissolving melamine into ethylenediamine by handshaking. The fullerene C₆₀ self-assembled rosette crystals were synthesized by following the commonly used liquid-liquid interphase precipitation method. A certain amount of isopropyl alcohol was added into a glass vial (10.0 mL) containing the freshly prepared C₆₀ solution in m-xylene and well-mixed by simple handshaking for about 5 s. The resulting mixture was then added quickly into melamine solution and immediately hand shaken for about 3 s. The slurry was incubated at 25 °C for 6 h without any external mechanical disturbances. The precipitates were separated from the mixture by centrifugation, followed by washing with isopropyl alcohol (5 mL) and deionized water (5.0 mL) three times to remove the organic solvents and melamine and finally dried in an oven at 70 °C under vacuum for 6 h.

The VOC sensing property of these novel fullerene nanomaterials was carried out using the QCM technique. We monitored the frequency shift in the Au-resonator decorated with studied materials as QCM electrodes that were exposed to different organic vapors by a resonance frequency of 9 MHz (AT-cut). Notably, the stability of the QCM electrode was ± 2 Hz in the air for 10 min. The QCM sensor electrode was modified with our materials by drop casting and then plugged onto the instrument and then exposed to the studied volatile organic solvents (10 mL in an open container) at room temperature. The chamber was immediately sealed to minimize the escaping of vapors and create a saturated vapor atmosphere during the frequency monitoring. Once the frequency reached equilibrium, the chamber was opened for the desorption of vapors.

4 . 研究成果

➤ **Corn-Husk-Shaped Fullerene Crystals as Excellent Acid Vapor Sensors**

We have successfully fabricated novel corn-husk-shaped fullerene C₆₀ crystals (CHFCs) through the dynamic liquid-liquid inter-facial precipitation method. The CHFCs were grown at the liquid-liquid interface between isopropyl alcohol (IPA) and a saturated solution of C₆₀ in mesitylene under ambient temperature and pressure conditions. The average length, outer diameter, and inner diameter of CHFCs were ca. 2.88 µm, 672 nm, and 473 nm, respectively. X-ray diffraction (XRD) analysis showed the CHFCs exhibit a mixed face-centered cubic (fcc) and hexagonal-close pack (hcp) crystal phases with lattice parameters $a = 1.425$ nm, $V = 2.899$ nm³ for fcc phase and $a = 2.182$ nm, $c = 0.936$ nm, a/c ratio = 2.33, $V = 3.859$ nm³ for hcp phase. The CHFCs possess mesoporous structure as confirmed by transmission electron microscopy (TEM) and nitrogen sorption analysis. The specific surface area and the pore volume were ca. 57.3 m² g⁻¹, 0.149 cm³ g⁻¹, respectively, are higher than the nonporous pristine fullerene C₆₀. Quartz crystal microbalance (QCM) sensing results show the excellent sensing performance CHFCs sensitive to acetic acid vapors due to the enhanced diffusion via mesoporous architecture and hollow structure of the CHFCs, demonstrating the potential of the material for the development of a new sensor system for aliphatic acid vapors sensing.

[*Chemosensors* **2022**, *10*, 16. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10010016>]

➤ **Fullerphene Nanosheets: 2D Material for Single-Carbon-Atom-Level Molecular Discrimination**

We have demonstrated bottom-up fabrication of a novel molecularly thin nitrogen-doped 2D fullerphene. Thermal annealing at 700 °C of a bottom-up assembled fullerene C₆₀-ethylenediamine (EDA) thin film results in formation of a nitrogen-doped ultrathin carbon film, fullerphene, which exhibits a hierarchically micro/mesoporous structure at its surfaces. N-doping of fullerphene is dominated by pyrrolic and quaternary nitrogen atoms, which allow selective and repetitive adsorption and desorption of low-molecular-weight carboxylic acid vapors through non-covalent interactions. The large surface area (655.2 m² g⁻¹) and pore volume (0.659 cc g⁻¹) offered by the hierarchical micro/mesoporous architecture leads to superior sensitivity of fullerphene to formic acid over acetic acid in the vapor phase demonstrating that novel 2D

fullerene provides an attractive platform for the discrimination of carboxylic acids at the single-carbon-atom level. Ultrathin two-dimensional (2D) nanoporous materials offer enhanced sensitivity and high spatial resolution in sensing applications making them important for the selective discrimination of guest molecules.

[*Adv. Mater. Interfaces* **2022**, *9*, 2102241. <https://doi.org/10.1002/admi.202102241>]

➤ **Fullerene Rosette: 2D Materials for the Selective Vapor Sensing**

Using in situ reactive methods to the self-assembly process of C₆₀ molecules with melamine/ethylenediamine components in solution, we have demonstrated a novel type of fullerene assemblies, micron-sized two-dimensional, amorphous shape-regular objects, fullerene rosettes. The fullerene rosettes are made from the accumulation of bilayer/monolayer assemblies of hybridized fullerenes in low crystallinity. Proto-type sensor systems were fabricated upon immobilization of the fullerene rosettes onto surfaces of quartz crystal microbalance (QCM), and selective sensing of formic acid was demonstrated as preliminary results for social-demanded toxic material sensing. The QCM sensor with fullerene rosette is categorized as one of the large-response sensors among reported examples. In selectivity to formic acids against basic guests (formic acid/pyridine > 30) or aromatic guests (formic acid/toluene > 110), the fullerene rosette based QCM sensor also showed superior performances.

Although we here selected a QCM device as a conventional sensor system, more advanced sensor devices can be applied. Simple and handy QCM sensors demonstrated in this work can mainly give direction of the usages of the fullerene rosettes, but further applications of the fullerene rosettes to more advanced sensor devices with gas-flow control apparatus will provide much better capabilities for toxic VOCs sensing with good limit of detections. Emerging concepts for materials designs such as materials nanoarchitectonics and materials informatics can be used for fabrications for sensing materials as well as traditional techniques such as the Langmuir-Blodgett method and later-by-later assembly for materials-sensor interfacing. Combinations of the materials design and system integration would create advanced sensing systems only using simple molecules like fullerenes.

[*Intl. J. Mol. Sci.* **2022**, *23*, 5454. <https://doi.org/10.3390/ijms23105454>]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計37件（うち査読付論文 37件 / うち国際共著 35件 / うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Shrestha Lok Kumar, Wei Zexuan, Subramaniam Gokulnath, Shrestha Rekha Goswami, Singh Ravi, Sathish Marappan, Ma Renzhi, Hill Jonathan P., Nakamura Junji, Ariga Katsuhiko	4. 巻 13
2. 論文標題 Nanoporous Hollow Carbon Spheres Derived from Fullerene Assembly as Electrode Materials for High-Performance Supercapacitors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 946 ~ 946
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano13050946	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 Perez-Calm Adria, Shrestha Lok Kumar, Magana Jose Rodrigo, Esquena Jordi, Salonen Laura M., Shrestha Rekha Goswami, Ma Renzhi, Ariga Katsuhiko, Rodriguez-Abreu Carlos	4. 巻 95
2. 論文標題 Perylene-Templated Hierarchically Porous Carbon Fibers as Efficient Supercapacitor Electrode Material	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1687 ~ 1696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20220245	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 Shrestha Lok Kumar, Shahi Sabina, Gnawali Chhabi Lal, Adhikari Mandira Pradhananga, Rajbhandari Rinita, Pokharel Bhadra P., Ma Renzhi, Shrestha Rekha Goswami, Ariga Katsuhiko	4. 巻 15
2. 論文標題 Phyllanthus emblica Seed-Derived Hierarchically Porous Carbon Materials for High-Performance Supercapacitor Applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 8335 ~ 8335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20220245	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 Chen Guoping, Sciortino Flavien, Takeyasu Kotaro, Nakamura Junji, Hill Jonathan P., Shrestha Lok Kumar, Ariga Katsuhiko	4. 巻 17
2. 論文標題 Hollow Spherical Fullerene Obtained by Kinetically Controlled Liquid-Liquid Interfacial Precipitation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemistry - An Asian Journal	6. 最初と最後の頁 e202200756
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma15238335	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 Wong Chui-Wei, Tsai Kun-Che, Shrestha Lok Kumar, Ariga Katsuhiko, Hsu Shan-hui	4. 巻 14
2. 論文標題 Effects of hydrophilic fullerene nanoarchitected structures on the behaviour of neural stem cells	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 11152 ~ 11161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asia.202200756	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 Shrestha Rekha Goswami, Maji Subrata, Mallick Aabhash Kumar, Jha Abhimanyu, Man Shrestha Rajeshwar, Rajbhandari Rinita, Hill Jonathan P., Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 95
2. 論文標題 Hierarchically Porous Carbon from <i>Phoenix dactylifera</i> Seed for High-Performance Supercapacitor Applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1060 ~ 1067
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2NR01817A	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 Shrestha Lok Kumar, Shrestha Rekha Goswami, Shahi Sabina, Gnawali Chhabi Lal, Adhikari Mandira Pradhananga, Bhadra Biswa Nath, Ariga Katsuhiko	4. 巻 72
2. 論文標題 Biomass Nanoarchitectonics for Supercapacitor Applications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Oleo Science	6. 最初と最後の頁 11 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20220129	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 Bhadra Biswa Nath, Shrestha Lok Kumar, Ariga Katsuhiko	4. 巻 33
2. 論文標題 Porous Boron Nitride Nanoarchitectonics for Environment: Adsorption in Water	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials	6. 最初と最後の頁 637 ~ 662
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5650/jos.ess22377	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 Velu Karthick, Shrestha Rekha Goswami, Shrestha Lok Kumar, Ariga Katsuhiko	4. 巻 13
2. 論文標題 Recent Advancements in Novel Sensing Systems through Nanoarchitectonics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biosensors	6. 最初と最後の頁 286 ~ 286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10904-023-02594-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 該当する

1. 著者名 Song Jingwen, Murata Tomohiro, Tsai Kun Che, Jia Xiaofang, Sciortino Flavien, Ma Renzhi, Yamauchi Yusuke, Hill Jonathan P., Shrestha Lok Kumar, Ariga Katsuhiko	4. 巻 9
2. 論文標題 Fullerphene Nanosheets: A Bottom Up 2D Material for Single Carbon Atom Level Molecular Discrimination	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Materials Interfaces	6. 最初と最後の頁 2102241-2102241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/bios13020286	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 Chen Guoping, Bhadra Biswa Nath, Sutrisno Linawati, Shrestha Lok Kumar, Ariga Katsuhiko	4. 巻 23
2. 論文標題 Fullerene Rosette: Two-Dimensional Interactive Nanoarchitectonics and Selective Vapor Sensing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Molecular Sciences	6. 最初と最後の頁 5454-5454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ijms23105454	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 Wei Zexuan, Song Jingwen, Ma Renzhi, Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 10
2. 論文標題 Self-Assembled Corn-Husk-Shaped Fullerene Crystals as Excellent Acid Vapor Sensors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemosensors	6. 最初と最後の頁 16-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/chemosensors10010016	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 Joshi Sahira, Shrestha Rekha Goswami, Pradhananga Raja Ram, Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 8
2. 論文標題 High Surface Area Nanoporous Activated Carbons Materials from Areca catechu Nut with Excellent Iodine and Methylene Blue Adsorption	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 C	6. 最初と最後の頁 2-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/c8010002	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 Shrestha Lok, Shrestha Rekha, Chaudhary Rashma, Pradhananga Raja, Tamrakar Birendra, Shrestha Timila, Maji Subrata, Shrestha Ram, Ariga Katsuhiko	4. 巻 11
2. 論文標題 Nelumbo nucifera Seed-Derived Nitrogen-Doped Hierarchically Porous Carbons as Electrode Materials for High-Performance Supercapacitors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 3175-3175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admi.202102241	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 Maji Subrata, Shrestha Lok Kumar, Ariga Katsuhiko	4. 巻 11
2. 論文標題 Nanoarchitectonics for Hierarchical Fullerene Nanomaterials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 2146-2146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ijms23105454	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 Chen Guoping, Shrestha Lok Kumar, Ariga Katsuhiko	4. 巻 26
2. 論文標題 Zero-to-Two Nanoarchitectonics: Fabrication of Two-Dimensional Materials from Zero-Dimensional Fullerene	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Molecules	6. 最初と最後の頁 4636-4636
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/chemosensors10010016	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 Hynek J., Payne D.T., Chahal M.K., Sciortino F., Matsushita Y., Shrestha L.K., Ariga K., Labuta J., Yamauchi Y., Hill J.P.	4. 巻 21
2. 論文標題 Enhancement of singlet oxygen generation based on incorporation of oxoporphyrinogen (OxP) into microporous solids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Today Chemistry	6. 最初と最後の頁 100534-100534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/c8010002	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 Ariga Katsuhiko, Tsai Kun-Che, Shrestha Lok Kumar, Hsu Shan-hui	4. 巻 5
2. 論文標題 Life science nanoarchitectonics at interfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Chemistry Frontiers	6. 最初と最後の頁 1018 ~ 1032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano11123175	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 Shrestha Rekha Goswami, Shrestha Lok Kumar, Ariga Katsuhiko	4. 巻 7
2. 論文標題 Carbon Nanoarchitectonics for Energy and Related Applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 C	6. 最初と最後の頁 73 ~ 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano11082146	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 Maji Subrata, Shrestha Rekha Goswami, Lee Jaewoo, Han Sang A, Hill Jonathan P., Kim Jung Ho, Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 94
2. 論文標題 Macaroni Fullerene Crystals-Derived Mesoporous Carbon Tubes as the High Rate Performance Supercapacitor Electrode Material	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 1502-1509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/molecules26154636	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 Ahmed Mahmoud M. M., Imae Toyoko, Ohshima Hiroyuki, Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 94
2. 論文標題 External Magnetic Field-Enhanced Supercapacitor Performance of Cobalt Oxide/Magnetic Graphene Composites	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 2245 ~ 2251
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtchem.2021.100534	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 Hill Jonathan P., Shrestha Rekha Goswami, Song Jingwen, Ji Qingmin, Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 94
2. 論文標題 Monitoring the Release of Silver from a Supramolecular Fullerene C60-AgNO3 Nanomaterial	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 1347 ~ 1354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0qm00615g	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 Shrestha Ram Lal, Chaudhary Rashma, Shrestha Rekha Goswami, Shrestha Timila, Maji Subrata, Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 94
2. 論文標題 Washnut Seed-Derived Ultrahigh Surface Area Nanoporous Carbons as High Rate Performance Electrode Material for Supercapacitors	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 565 ~ 572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/c7040073	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 Minami Kosuke, Song Jingwen, Shrestha Lok Kumar, Ariga Katsuhiko	4. 巻 23
2. 論文標題 Nanoarchitectonics for fullerene biology	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Materials Today	6. 最初と最後の頁 100989 ~ 100989
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20210059	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 Maji Subrata, Chaudhary Rashma, Shrestha Rekha Goswami, Shrestha Ram Lal, Demir Baris, Searles Debra J., Hill Jonathan P., Yamauchi Yusuke, Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 4
2. 論文標題 High-Performance Supercapacitor Materials Based on Hierarchically Porous Carbons Derived from Artocarpus heterophyllus Seed	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 12257 ~ 12266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20210222	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 Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 13
2. 論文標題 Fullerene Nanoarchitectonics with Shape-Shifting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 2280 ~ 2280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20210028	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 Shrestha Ram Lal, Shrestha Timila, Tamrakar Birendra Man, Shrestha Rekha Goswami, Maji Subrata, Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 13
2. 論文標題 Nanoporous Carbon Materials Derived from Washnut Seed with Enhanced Supercapacitance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 2371 ~ 2371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20200314	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 Rodriguez-Abreu Carlos, Kolen'ko Yury V., Kovnir Kirill, Sanchez-Dominguez Margarita, Shrestha Rekha Goswami, Bairi Partha, Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 22
2. 論文標題 1D materials from ionic self-assembly in mixtures containing chromonic liquid crystal mesogens	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 23276 ~ 23285
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apmt.2021.100989	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 Chaudhary Rashma, Maji Subrata, Shrestha Rekha Goswami, Shrestha Ram Lal, Shrestha Timila, Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 6
2. 論文標題 Jackfruit Seed-Derived Nanoporous Carbons as the Electrode Material for Supercapacitors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 C	6. 最初と最後の頁 73 ~ 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.1c02051	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 Shrestha Ram Lal, Chaudhary Rashma, Shrestha Timila, Tamrakar Birendra Man, Shrestha Rekha Goswami, Maji Subrata, Hill Jonathan P., Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 13
2. 論文標題 Nanoarchitectonics of Lotus Seed Derived Nanoporous Carbon Materials for Supercapacitor Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 5434 ~ 5434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma13102280	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 Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 2
2. 論文標題 Zero-to-one (or more) nanoarchitectonics: how to produce functional materials from zero-dimensional single-element unit, fullerene	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Advances	6. 最初と最後の頁 582 ~ 597
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma13102371	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 Shrestha Ram Lal, Chaudhary Rashma, Shrestha Rekha Goswami, Shrestha Timila, Maji Subrata, Ariga Katsuhiko, Shrestha Lok Kumar	4. 巻 94
2. 論文標題 Washnut Seed-Derived Ultrahigh Surface Area Nanoporous Carbons as High Rate Performance Electrode Material for Supercapacitors	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 565 ~ 572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0cp04348f	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 Ariga Katsuhiko, Tsai Kun-Che, Shrestha Lok Kumar, Hsu Shan-hui	4. 巻 5
2. 論文標題 Life science nanoarchitectonics at interfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Chemistry Frontiers	6. 最初と最後の頁 1018 ~ 1032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/c6040073	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 Ariga Katsuhiko, Tsai Kun-Che, Shrestha Lok Kumar, Hsu Shan-hui	4. 巻 5
2. 論文標題 Life science nanoarchitectonics at interfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Chemistry Frontiers	6. 最初と最後の頁 1018 ~ 1032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma13235434	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 Ariga Katsuhiko, Tsai Kun-Che, Shrestha Lok Kumar, Hsu Shan-hui	4. 巻 5
2. 論文標題 Life science nanoarchitectonics at interfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Chemistry Frontiers	6. 最初と最後の頁 1018 ~ 1032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0ma00744g	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 Ariga Katsuhiko, Tsai Kun-Che, Shrestha Lok Kumar, Hsu Shan-hui	4. 巻 5
2. 論文標題 Life science nanoarchitectonics at interfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Chemistry Frontiers	6. 最初と最後の頁 1018 ~ 1032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20200314	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 Ariga Katsuhiko, Tsai Kun-Che, Shrestha Lok Kumar, Hsu Shan-hui	4. 巻 5
2. 論文標題 Life science nanoarchitectonics at interfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Chemistry Frontiers	6. 最初と最後の頁 1018 ~ 1032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0qm00615g	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

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------