

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03918

研究課題名(和文) 共役高分子骨格の構造と電子輸送性～界面構造・骨格構造変形とキャリア種の全貌～

研究課題名(英文) Total Landscape of Charge Carrier Transport on Conjugated Polymer Backbones

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) 34,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、共役高分子界面・変形下での電子輸送特性を、定量分析できる3つの計測装置：TRMC@Interfaces・TRMC-@Transformation・TRMC-Impedance複合計測法を用いて、高分子骨格構造の特異点である高分子-固体界面における電荷移動度を選択的な計測を実現した。特に2次元界面内での高分子凝集構造・骨格規則性を反映して、共役物質-絶縁体界面に高い伝導層と顕著な異方伝導特性が存在することを明らかにした。また、伝導特性を最大限に引き出す2次元共役電子系を設計し、この界面伝導特性と酸化還元反応の評価をすすめ、高効率水素発生系へと展開が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した計測法はいずれも、界面における電子伝導特性を非接触・非破壊で定量分析する手法として、これまで存在しなかった“測れなかったものを測る”計測法でもある。特に、骨格自由度の大きな共役高分子が界面においてどのような凝集構造・骨格構造を取り、その電子共役系が電子輸送に対しどこまで有効に働かか、という共役高分子を用いた電子材料開発に欠かせない計測法を提供する。外場による高分子骨格の変調構造・界面における共役骨格の微視的構造因子と電荷輸送特性の関連を今後さらに回折手法と組み合わせることで、理想的な界面構造は何か？という大きな課題に決定的な解を与えられると考えている。

研究成果の概要(英文)：We have developed three game-changing spectroscopic technique for local charge carrier mobility at the interfaces of conjugated polymers and electronic materials: TRMC@Interfaces, TRMC@Transformation, and TRMC-Impedance Combined techniques. Along with the above three key techniques, the local charge carrier mobility at interfaces has been well determined for polythiophenes, PPE, and polyacetylenes on insulating electronic materials, exhibiting efficient conductive channels in contrast to their bulk states, reflecting their unique aggregated structures on 2D planar surfaces. We have also developed a series of 2D conjugated polymers with unique electronic conjugation over the skeletons, and confirmed the highly mobile electrons by the above spectroscopic techniques. The mobile charges have been well implemented as the reactive transient species in photo-induced oxidation-reduction of water molecules, suggesting high photo-catalytic activities in hydrogen evolution reactions.

研究分野：高分子化学

キーワード：界面 共役高分子 電子輸送 光エネルギー 水素発生 2次元 COF ポリアセチレン

1 . 研究開始当初の背景

Flory - Huggins 理論を端緒とする高分子骨格構造にかかわる統計力学的解析は、高分子溶液・高分子融体・高分子固体を問わず極めて洗練された解釈を与えてきた。均一系における構造に関するこの解釈を裏打ちする理論の「美しさ」とは裏腹に、「界面」あるいは「不均一系」における実際の高分子構造についての完全予測は依然として難しい。固体中における高分子鎖自由度が強く制限された界面は、高分子構造の特異点になることが示唆されて久しいが、例えば高分子素子において界面構造の実験的解析結果が「個別のケース」への対処として現在も行われている。共役高分子の電子材料としての利用が活発に模索される中、例えば OFET・OLED・OPVc 素子中では、実際に素子特性を支配するのが界面から数~10 nm 程度の領域の高分子構造である。近年の X 線回折測定法の進展は、極薄膜における高分子固体の不均一構造の解明において強力なツールとなっているが、上述の均一系における理論のほぼ完備ともいえる定量性に比して、例えば "Edge-on" / "Face-on" といった修辭でくくられる場合が極めて多いなど、定量性とその支配因子への踏み込みが不十分であり、このような高分子骨格構造に対する定性的議論の打開、特殊環境下に置かれた高分子の物性について精密かつ定量的な評価が必要不可欠である。

2 . 研究の目的

本研究では、半導体デバイス界面・変形・固体内における電子輸送特性を、定量的・完全実験的に、かつきわめて迅速に評価できる 3 つのタイプの計測装置を軸に、1) 高分子骨格構造の特異点である高分子 固体界面における電荷移動度を選択的に計測する「Time Resolved Microwave Conductivity (TRMC)@Interfaces」を用いて骨格自由度と主鎖電荷移動度の相関を明らかにする、2) 「TRMC@Interfaces-Impedance 複合計測法」を展開し、OFET・OLED・OPVc の素子構造における電荷の注入・輸送における「すべての」制御因子を迅速・かつ定量的に明らかにする普遍的計測法として提案する、3) 共役高分子固体振動と電荷輸送特性の同期計測法である「TRMC@Transformation」法を開発し、共役高分子固体変形下における電荷輸送の迅速定量評価を行い、高分子骨格の変形における包括的支配因子である Landau-de Gennes free energy との相関を明らかにする、4) TRMC-ESR 複合計測法を用いて、共役高分子骨格上の分子鎖内電荷移動度と伝導種・スピン状態の同時かつ完全実験的定量分析を行う、以上 4 点を目的としている。

3 . 研究の方法

TRMC@Interfaces においては、空洞共振器内の電場ベクトル方向との最適化により、すでに単純な Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) 素子の導入が実現されている。MIS 素子での充放電過程の詳細な解析によって電極・半導体層への電荷注入量とその極性(Hole/Electron)、素子構造の静電容量、Impedance 複合化による深さ方向の推定などが外部回路によって検出可能である。一方で、MIS 構造を包含する空洞共振器内の誘電損失の測定により、多層化された OLED 素子・電極構造の異なる FET 素子においても、TRMC 測定による局所移動度の in-situ 分析を行う。TRMC-ESR 複合計測では、TRMC 法を基盤として、キャリア数・キャリア種定量法としての電子スピン共鳴 (ESR) 分光および紫外可視吸収分光測定を三元融合する。「動かない」電子の定量分析により共役高分子骨格中の電荷局在サイトの絶対定量を、「動く」電子の計測により、バルク内の高分子構造と主鎖内伝導特性、不均一構造 (結晶構造と非晶構造、結晶子のサイズ等) 中での本質的伝導特性について解明する。

4 . 研究成果

研究前半における研究項目 1) 及び 2): TRMC@Interfaces による半導体 - 共役高分子界面における高分子骨格構造の特異性を反映した電子伝導特性評価、並びに TRMC@Transformation 法による共役分子の応力下における構造変調と電子伝導特性評価はともに順調に進行し、TRMC@Interfaces-Impedance 複合計測法による界面に平行・直交する異方電子輸送特性を明らかにすることができた。この一例を図 1 に示す。共役分子 - 金属界面を有するデバイスにおいて、界面障壁を越えて注入するキャリア数を、バイアスへの正弦波印可により正確に直交方向における素子インピーダンスとして求め、素子の各界面における障壁高さを見積もることができる。一方で、同時にこの素子を TRMC 測定法における空洞共振器中に持ち込み、素子界面と平行方向への電荷輸送特性をマイクロ波の電力損失として見積もった。この TRMC@Interfaces-Impedance 複合計測法は、それぞれ独立に界面に対する相対座標を個別に見積もることが可能であることを示しており、この素子の場合、直交方向における電荷輸送が大きな律速過程であることが示された。界面高分子構造の特異性を反映して、2 次元面内に配向した高分子骨格は、固体

構造内の高分子凝集構造に比較して良好な電荷輸送特性を示すことが明らかとなった。

研究後半では、新型コロナウイルスの影響により、国内・国際を問わず学会等における研究成果発表は多数見送ることとなったが、一部オンラインによる研究発表に加え、研究目的3) 伝導種・スピン状態と電子輸送特性の完全定量分析、研究項目4) ESR-TRMC 複合計測による伝導種と輸送能の相関解明について、EU-UHMob コンソーシアムにおけるブリュッセル自由大学・ケンブリッジ大学・ストラスブル大学・米国プリンストン大学と、この手法を利用した新しい共役分子・高分子の構造 - 電子物性相関に関わる研究を推進した。加えて、巨大平面構造を有する高分子である Covalent Organic Framework (COF) の新規合成とその電子状態評価に成功した。

これまで COF 材料ではその難溶性や薄膜形成の難しさから、粉末状態で計測・評価が行われることが多く、その電子状態や光学特性の評価が極めて困難であった。本研究では、光学的平滑性を保った状態でこのような COF 材料を薄膜化することに成功し、この固体状態での光励起水素発生触媒としての特性評価を進めた。特に、励起 - 電離 - 電荷輸送 - 酸化還元反応活性点の環境、さまざまな支配因子が予測される中、COF 共役フレーム内の Pt 助触媒への電子移動過程が全体の酸化還元反応系の最適化に重要な因子であることが、TRMC@Interfaces 法を用いて明らかとなり、2次元発達共役フレーム内の高速な電荷輸送の直接観察にも成功した。本材料系の薄膜作製法を用いてさらに新規な COF である AntTTH と AntTTF の合成とその電子特性評価へと研究を進めた。AntTTH および AntTTF は 9,10-bis(4-aminophenylethynyl)anthracene (AntT) と triformylphloroglucinol (TH) および 1,3,5-triformylbenzene (TF) を基質として合成を行ったところ、X 線構造解析、透過電子顕微鏡像等から均質な構造が構成されていることが確認できた。吸収スペクトル測定では散乱の影響が少なく振動構造の確認できる光学スペクトルを得ることに成功しており、AntTTH は AntTTF よりも長波長側に吸収が成長していた。

光励起型マイクロ波時間分解電気伝導度測定法 (FP-TRMC 法) を用い、過渡光電気伝導度の測定を行ったところ、 $7.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ と COF 材料の中でもトップクラスの光電気伝導度を有していた。加えて異方性測定では、面内方向の輸送特性が面直方向に比べ3倍以上高いことが確認できている。光電気伝導度の温度依存性を測定したところ、AntTTH は 14.3 meV と極めて低い活性化エネルギーを有することが明らかとなった。理論計算により求めたバンド構造では、AntTTF の狭いバンド分散に比べて、AntTTH は面内方向、特に伝導帯に大きくバンド分散が見られており、電子の非局在化が示唆されている。これらのことから、ドメイン内における電子の非局在化の効果がマイクロ波電気伝導度に顕著に反映されていると考えている。AntTTH を素子化して光ディテクタとして動作させたところ、320 nW という低出力・1 V という低電圧の状態においても良好な光電流を発生している。近年グラフェン等と組み合わせた系においては高い光電流の検出が報告されているが、単体での光電流取り出しの例は非常に限られており、光ディテクタへの応用としても有望な材料系である。

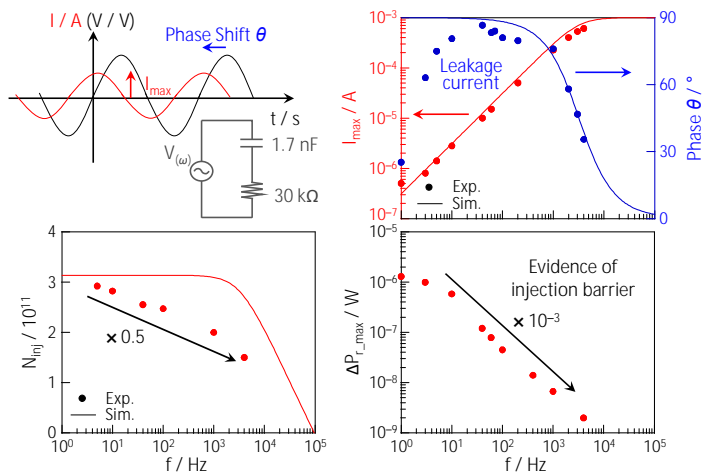


図 1. (左上) TRMC@Interfaces 測定法において Impedance 計測のために用いた Bias 波形、(右上) MIS 素子における電流と位相相関、(左下) 界面 Gap を超えて注入されたキャリア数、(右下) 同時に測定された注入キャリアによるマイクロ波電力損失。

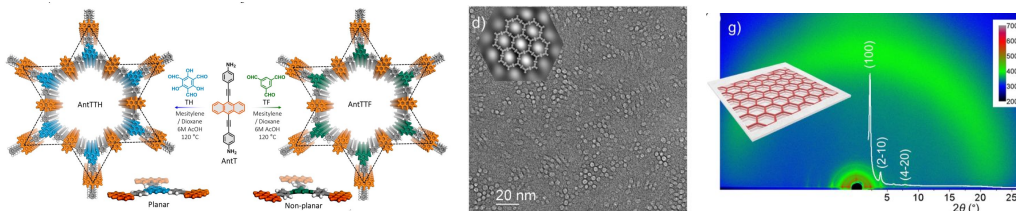


図 2. (左) 新規合成を行った COF 材料。(中) 透過型電子顕微鏡像。(右) 二次元 X 線回折 (2D-GIXS) パターンおよび一次元面内プロファイル。

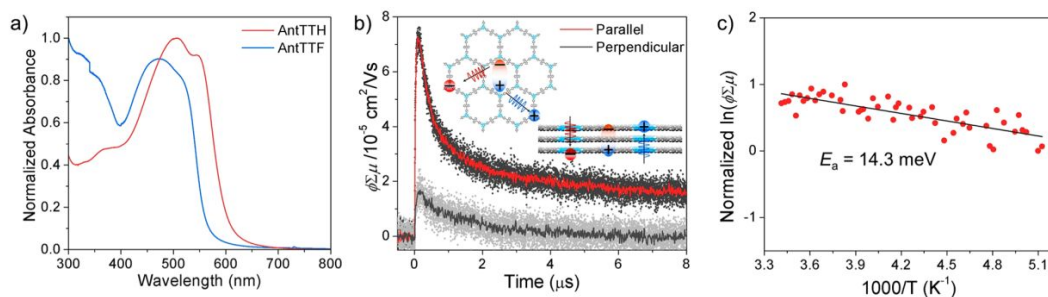


図 3. a) AntTTH (赤線) および AntTTF (青線) の吸収スペクトル。AntTTH の b) 時間分解マイクロ波電気伝導度測定法による過渡光電気伝導度の面内・面外異方性測定および c) 面内方向の光電気伝導度の温度依存性。

主な発表論文等

Solid-solid phase transition of rod-like conjugated chains giving stepwise expansion of inter-chain distances
Yusuke Hattori, Wakana Matsuda, Shu Seki
Chem. Phys. Lett. **2022**, 801, 139709.

Truxenone Triimide: Two-Dimensional Molecular Arrangements of Triangular Molecules for Air Stable n-Type Semiconductors
Sharvan Kumar, Yun Hee Koo, Tomohiro Higashino, Wakana Matsuda, Samrat Ghosh, Yusuke Tsutsui, Masayuki Suda, Hiroshi Imahori, Katsuaki Suzuki, Hironori Kaji, and Shu Seki
Adv Elect Mater. **2022**; 2101390.

Band-like Transport of Charge Carriers in Oriented Two-Dimensional Conjugated Covalent Organic Frameworks
Samrat Ghosh, Yusuke Tsutsui, Takahiro Kawaguchi, Wakana Matsuda, Shusaku Nagano, Katsuaki Suzuki, Hironori Kaji, and Shu Seki
Chem. Mater. **2022**, 34, 736–745

Facile synthesis of an ambient stable pyreno [4, 5-b] pyrrole monoanion and pyreno [4, 5-b: 9, 10-b0] dipyrrole dianion: from serendipity to design
Sharvan Kumar, Kohshi Yoshida, Yusuke Hattori, Tomohiro Higashino, Hiroshi Imahori, and Shu Seki
Chem. Sci. **2022**, 13, 1594-1599

Ubiquitous organic molecule-based free-standing nanowires with ultra-high aspect ratios
Koshi Kamiya, Kazuto Kayama, Masaki Nobuoka, Shugo Sakaguchi, Tsuneaki Sakurai, Minori Kawata, Yusuke Tsutsui, Masayuki Suda, Akira Idesaki, Hiroshi Koshikawa, Masaki Sugimoto, G. B. V. S. Lakshmi, D. K. Avasthi, and Shu Seki
Nat. Commun. **2021**, 21, 4025.

Oriented Nanowire Arrays with Phthalocyanine – C60 Multi-Heterojunctions
Masaki Nobuoka, Koshi Kamiya, Shugo Sakaguchi, Akira Idesaki, Tetsuya Yamaki, Tsuneaki Sakurai, and Shu Seki
J. Photopolym. Sci. Technol. **2021**, 34, 167-174.

Identification of Prime Factors to Maximize the Photocatalytic Hydrogen Evolution of Covalent Organic Frameworks
Samrat Ghosh, Akinobu Nakada, Maximilian A. Springer, Takahiro Kawaguchi, Katsuaki Suzuki, Hironori Kaji, Igor Baburin, Agnieszka Kuc, Thomas Heine, Hajime Suzuki, Ryu Abe, and Shu Seki
J. Am. Chem. Soc. **2020**, 142, 9752–9762.

Interactions of Single Particle with Organic Matters: A Facile Bottom-Up Approach to Low Dimensional Nanostructures
Shugo Sakaguchi, Koshi Kamiya, Tsuneaki Sakurai, and Shu Seki
Quantum Beam Sci. **2020**, 4, 7.

Extended conjugation of ESIPT-type dopants in nematic liquid crystalline phase for enhancing fluorescence efficiency and anisotropy
Wanying Zhang, Yusuke Tsutsui, Satoshi Suzuki, Tsuneaki Sakurai, Masanori Ozaki, and Shu Seki
Phys. Chem. Chem. Phys., **2020**, 22, 28393-28400.

Impact of Unsymmetrical Alkyl–Fluoroalkyl Side Chains over Coil-to-Rod Transition of Soluble Polyacetylenes: Modulation of Electronic Conjugation of Isolated Chains and Their Self-Assembly
Yoshihiro Motomura, Yusuke Hattori, Tsuneaki Sakurai, Samrat Ghosh, and Shu Seki
Macromolecules, **2019**, 52, 4916-4925.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件／うち国際共著 14件／うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 M. Liutkus, A. Lopez-Andarias, Sara H Mejias, Javier Lopez-Andarias, David Gil-Carton, Ferran Feixas, Silvia Osuna, Wakana Matsuda, Tsuneaki Sakurai, Shu Seki, Carmen Atienza, Nazario Martin, Aitziber L Cortajarena | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Protein-directed crystalline 2D fullerene assemblies | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Nanoscale | 6. 最初と最後の頁 3614-3622 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9NR07083D | 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 Shikha Sharma, S. Ghosh, Tanweer Ahmed, Suman Ray, Saurav Islam, Ulrike Salzner, Arindam Ghosh, S. Seki, Satish Patil | 4. 巻 2 |
| 2. 論文標題 Fermi Level Pinning Induced by Doping in Air Stable n-Type Organic Semiconductor | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 ACS Appl. Electron. Mater. | 6. 最初と最後の頁 66-73 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.9b00742 | 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 S. Ghosh, Akinobu Nakada, Maximilian A Springer, Takahiro Kawaguchi, Katsuaki Suzuki, Hironori Kaji, Igor Baburin, Agnieszka Kuc, Thomas Heine, Hajime Suzuki, Ryu Abe, S. Seki | 4. 巻 142 |
| 2. 論文標題 Identification of Prime Factors to Maximize the Photocatalytic Hydrogen Evolution of Covalent Organic Frameworks | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc. | 6. 最初と最後の頁 9752-9762 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.0c02633 | 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. Tsutsui, W. Zhang, S. Ghosh, T. Sakurai, H. Yoshida, M. Ozaki, T. Akutagawa, S. Seki | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 Electrically Switchable Amplified Spontaneous Emission from Liquid Crystalline Phase of an AIEE Active ES IPT Molecule | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Adv. Opt. Mater. | 6. 最初と最後の頁 1902158 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.201902158 | 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 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 | 4. 巻 3 |
| 2. 論文標題 Porphyrin Nanowire Bundles for Efficient Photoconductivity, Photoemission, and Generation of Singlet Oxygens toward Photodynamic Therapy | 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 Yusuke Tsutsui, Wanying Zhang, Samrat Ghosh, Tsuneaki Sakurai, Hiroyuki Yoshida, Masanori Ozaki, Tomoyuki Akutagawa, Shu Seki | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 Electrically Switchable Amplified Spontaneous Emission from Liquid Crystalline Phase of an AIEE Active ES IPT Molecule | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Advanced Optical Materials | 6. 最初と最後の頁 1902158 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.201902158 | 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 Jun Maruyama, Tsutomu Shinagawa, Mitsuru Watanabe, Yukiyasu Kashiwagi, Shohei Maruyama, Toru Nagaoka, Wakana Matsuda, Yusuke Tsutsui, Shu Seki, Hiroshi Uyama | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Helical Pore Alignment on Cylindrical Carbon | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Small | 6. 最初と最後の頁 1905916 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.201905916 | 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 Mantas Liutkus, Alicia Lopez-Andarias, Sara H Mejias, Javier Lopez-Andarias, David Gil-Carton, Ferran Feixas, Silvia Osuna, Wakana Matsuda, Tsuneaki Sakurai, Shu Seki, Carmen Atienza, Nazario Martin, Aitziber L Cortajarena | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Protein-directed crystalline 2D fullerene assemblies | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Nanoscale | 6. 最初と最後の頁 3614-3622 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9NR07083D | 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 Fengjiao Zhang, Vincent Lemaur, Wookjin Choi, Prapti Kafle, Shu Seki, Jerome Cornil, David Beljonne, Ying Diao | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Repurposing DNA-binding agents as H-bonded organic semiconductors | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Nature Communications | 6. 最初と最後の頁 4217 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-12248-9 | 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 Yoshihiro Motomura, Yusuke Hattori, Tsuneaki Sakurai, Samrat Ghosh, Shu Seki | 4. 巻 52 |
| 2. 論文標題 Impact of Unsymmetrical Alkyl-Fluoroalkyl Side Chains over Coil-to-Rod Transition of Soluble Polyacetylenes: Modulation of Electronic Conjugation of Isolated Chains and Their Self-Assembly | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Macromolecules | 6. 最初と最後の頁 4916-4925 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.9b00629 | 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 Yusuke Hattori, Nozomi Nishimura, Yusuke Tsutsui, Samrat Ghosh, Tsuneaki Sakurai, Kazunori Sugiyasu, Masayuki Takeuchi, Shu Seki | 4. 巻 55 |
| 2. 論文標題 Rod-like transition first or chain aggregation first? ordered aggregation of rod-like poly (p-phenyleneethynylene) chains in solution | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Chemical Communications | 6. 最初と最後の頁 13342-13345 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CC06892A | 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 Kohei Okino, Daisuke Sakamaki, Shu Seki | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Dicyanomethyl Radical-Based Near-Infrared Thermochromic Dyes with High Transparency in the Visible Region | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 ACS Materials Letters | 6. 最初と最後の頁 25-29 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmaterialslett.9b00049 | 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 Wanying Zhang, Satoshi Suzuki, SeongYong Cho, Go Watanabe, Hiroyuki Yoshida, Tsuneaki Sakurai, Mika Aotani, Yusuke Tsutsui, Masanori Ozaki, Shu Seki | 4. 巻 35 |
| 2. 論文標題 Highly Miscible Hybrid Liquid-Crystal Systems Containing Fluorescent Excited-State Intramolecular Proton Transfer Molecules | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Langmuir | 6. 最初と最後の頁 14031-14041 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.9b02272 | 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 Yuki Tsujimoto, Tsuneaki Sakurai, Yuichiro Ono, Shusaku Nagano, Shu Seki | 4. 巻 39 |
| 2. 論文標題 Cold Crystallization of Ferrocene-Hinged π -Conjugated Molecule Induced by the Limited Conformational Freedom of Ferrocene | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B | 6. 最初と最後の頁 8325-8332 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b06880 | 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 Jun Ma, Anil Kumar, Yusa Muroya, Shinichi Yamashita, Tsuneaki Sakurai, Sergey A Denisov, Michael D Sevilla, Amitava Adhikary, Shu Seki, Mehran Mostafavi | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Observation of dissociative quasi-free electron attachment to nucleoside via excited anion radical in solution | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Nature communications | 6. 最初と最後の頁 1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-08005-z | 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 Samrat Ghosh, Yusuke Tsutsui, Katsuaki Suzuki, Hironori Kaji, Kayako Honjo, Takashi Uemura, Shu Seki | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 Impact of the position of the imine linker on the optoelectronic performance of π -conjugated organic frameworks | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Molecular Systems Design & Engineering | 6. 最初と最後の頁 325-331 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8ME00079D | 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 Shikha Sharma, Samrat Ghosh, Tanweer Ahmed, Suman Ray, Saurav Islam, Ulrike Salzner, Arindam Ghosh, Shu Seki, Satish Patil | 4. 巻 2 |
| 2. 論文標題 Fermi Level Pinning Induced by Doping in Air Stable n-Type Organic Semiconductor | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials | 6. 最初と最後の頁 66-73 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.9b00742 | 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 Koshi Kamiya, Kazuto Kayama, Masaki Nobuoka, Shugo Sakaguchi, Tsuneaki Sakurai, Minoru Kawata, Yusuke Tsutsui, Masayuki Suda, Akira Idesaki, Hiroshi Koshikawa, Masaki Sugimoto, G. B. V. S. Lakshmi, D. K. Avasthi, and Shu Seki | 4. 巻 21 |
| 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 Nat. Commun. | 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 Sharvan Kumar, Kohshi Yoshida, Yusuke Hattori, Tomohiro Higashino, Hiroshi Imahori, and Shu Seki | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Facile synthesis of an ambient stable pyreno [4, 5-b] pyrrole monoanion and pyreno [4, 5-b: 9, 10-b0] dipyrrole dianion: from serendipity to design | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Chem. Sci. | 6. 最初と最後の頁 1594-1599 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1SC06070H | 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 Samrat Ghosh, Yusuke Tsutsui, Takahiro Kawaguchi, Wakana Matsuda, Shusaku Nagano, Katsuaki Suzuki, Hironori Kaji, and Shu Seki | 4. 巻 34 |
| 2. 論文標題 Band-like Transport of Charge Carriers in Oriented Two-Dimensional Conjugated Covalent Organic Frameworks | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Chem. Mater. | 6. 最初と最後の頁 736-745 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemmater.1c03533 | 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 Sharvan Kumar, Yun Hee Koo, Tomohiro Higashino, Wakana Matsuda, Samrat Ghosh, Yusuke Tsutsui, Masayuki Suda, Hiroshi Imahori, Katsuaki Suzuki, Hironori Kaji, and Shu Seki | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 Truxenone Triimide: Two-Dimensional Molecular Arrangements of Triangular Molecules for Air Stable n-Type Semiconductors | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Adv Elect Mater. | 6. 最初と最後の頁 2101390 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aelm.202101390 | 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 Yusuke Hattori, Wakana Matsuda, Shu Seki | 4. 巻 801 |
| 2. 論文標題 Solid-solid phase transition of rod-like conjugated chains giving stepwise expansion of inter-chain distances | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Chem. Phys. Lett. | 6. 最初と最後の頁 139709 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpllett.2022.139709 | 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3件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shu SEKI |
| 2. 発表標題 Integrated Electromagnetic Wave Spectroscopy Techniques: A Powerful Tool for Optoelectronic and Biochemical Materials |
| 3. 学会等名 The 4th Materials Chemistry Frontiers International Symposium (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shu SEKI |
| 2. 発表標題 CARBON-BASED ELECTRONIC MATERIALS AND INTERFACES: NON-CONTACT APPROACH |
| 3. 学会等名 2nd From Carbon-Rich Molecules to Carbon-Based Materials Conference (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shu SEKI |
| 2. 発表標題 Organic Semiconductor Molecules at the Interfaces: Non-Contact Assessment by Microwave Electrical Conductivity Measurements |
| 3. 学会等名 233rd ECS Meeting (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 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 櫻井 庸明 (Sakurai Tsuneaki) (50632907) | 京都大学・工学研究科・助教 (14301) | |
| 研究分担者 | 酒巻 大輔 (Sakmaki Daisuke) (60722741) | 大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・助教 (24403) | |

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 |
|---------|---------|