

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20562

研究課題名（和文）高分子超伝導の実現

研究課題名（英文）Development of polymeric superconductor

研究代表者

渡邊 峻一郎（Watanabe, Shun）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：40716718

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、パイ共役系高分子において、超伝導転移を実現を目指した物質科学の研究を遂行した。1高分子ユニットあたり1電荷が実現された高伝導度高分子において、金属的な電子輸送が実現していることが明らかとなった。また、低分子結晶表面に高密度にドーピングを施した結果、有機半導体では世界初となる金属絶縁体転移を観測することに成功した。本結果は、乱れを有する系においても電子相転移が実現することを示唆し、超伝導転移の可能性も見出されつつある。最終目的であった高分子超伝導の実現は達成されなかったが、ドーパント材料とドーピング技術に多大な成果が得られ、低温物性測定を継続することで電子相転移の可能性を模索する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、高分子半導体のナノスケール空隙を機能性空間として活用することにより、ホストの構造周期性を乱すことなくゲストとなる異種分子の導入・脱離・交換を実現した。高い結晶性・高い電気伝導度が実現された高分子の中では、電子は波のように振る舞い、通常の金属が示す電子物性をすべからず満たすことも分かってきた。つまり、固体物理学の標準理論で説明可能な電子相転移が高分子材料でも実現する可能性が強く示唆された。高分子の結晶性と電子物性を固体物理学の観点から整備した上で物質科学を展開することで、貴金属の代替だけでなく、様々な物理化学現象の制御に貢献することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：We carried out material science research aiming at the realization of superconducting transition in pi-conjugated polymers. Metallic conduction in highly doped conductive polymers has been realized when a reasonably large carrier density, such as one charge per polymer unit, is realized. In addition, as a result of high-density doping on the surface of single crystalline small molecules, we succeeded in observing the world's first metal-insulator transition in organic semiconductors. This result suggests that the electronic phase transition is feasible even in disordered systems, and the possibility of a superconducting transition is being highlighted. Although the ultimate goal of polymer superconductivity was not achieved, significant results were obtained in dopant materials and doping technology.

研究分野：高分子物性

キーワード：高分子 化学ドーピング 超伝導

1. 研究開始当初の背景

凝縮系固体材料における超伝導は 100 年に渡り固体物理学の主演であり、実験・理論の両側面から精力的に研究されている。様々な高温超伝導体が開発され、超電導リニアや量子アニーラ型コンピュータなどに応用されつつある。古典的な超伝導現象を説明する BCS 理論が確立されてすぐの 1964 年、William A. Little によって一次元の有機高分子においても、超伝導状態が実現することが理論的に予想された[1,2]。このモデルの正否には賛否両論あるものの、鎖状の共役高分子上で自由に動き回る電子が、強い分極を有するイオン性ドーパント分子の影響でクーパ対を構成し、超伝導が実現することが提案された。Little の荒い近似計算によると、適切な分子を合成できた場合には、その超伝導転移温度は $T_c = 2,200 \text{ K}$ (約 2,000) となり、室温を大幅に超える超伝導体が発見されると予想している。その後の理論研究から、 T_c はこれほど高くはなり得ないことが指摘されたが、それでも $T_c = 100 \text{ K}$ 程度は十分に実現可能ではないかと示唆されている[3,4]。

1980 年には、有機電荷移動錯体である TMTSF (tetramethyltetraselenafulvalene)塩において初めて有機超伝導 ($T_c = 0.7 \text{ K}$)が観測された[5]。その後、次々と有機電荷移動錯体を中心とした有機超伝導体が開発され、その転移温度も 20 K 程度まで向上している[6]。

一方で、Little の予言以来、半世紀にわたり高分子超伝導体の実現に向けた材料設計・合成が精力的に行われたものの、超伝導転移を観測するどころか、超伝導転移の予兆である金属的な電子状態さえ実現できていない。ここで、Little の予言や有機電荷移動錯体の事例から、高分子超伝導に必要とされる要件を総括する。

- (i) 一次元に伸びきった高分子伝導骨格からなる結晶性
- (ii) 伝導骨格と空間的分離されたキャリアドーパント
- (iii) 高分子伝導骨格における縮退した電子系注 3

これらを全て達成した上で、初めて高分子超伝導の実験的検証が可能となる。特に (iii)縮退した電子系を達成しつつ、1 分子ユニットあたり 1 電子以上の高い電荷密度を実現することは有機電荷移動錯体やフラレン系の超伝導体で必須とされている。研究実施者は、一貫して共役高分子の電子状態の研究を行っており、ごく最近、これらの (i)-(iii)の要件を全てを満たす可能性のある革新的な導電性高分子薄膜の開発に成功している (S. Watanabe, Nature Materials 15, 896 (2016), S. Watanabe, Nature, 572, 634 (2019))。具体的には、ポリチオフェン系の剛直な共役高分子鎖を自己組織的に配列させたのちに、ドーパント分子の蒸気や水溶液に暴露することで、大量のドーパント分子を導入できることを見出した。これを契

機に、導入されたドーパント分子を精緻に配列させつつ、別種のドーパントにイオン交換することも可能となった。その結果、室温で縮退した電子状態を有する高分子薄膜を開発することに成功した。図 1 に有機電荷移動錯体 (TMTFS)₂ PF₆ と新規に開発した金属性高分子/PF₆ 複合体の結晶構造を示した。両材料ともに、電子の流れる伝導層がキャリアドーパント PF₆ 層と空間的に分離した積層構造が得られている。また両材料の室温における電気伝導度やその温度依存性も極めて類似することがすでに確かめられている。従って、新規に開発した高分子薄膜中では、超伝導を示す有機電荷移動錯体の有する電子状態と極めて類似した電子物性が期待できると言える。Little の予言から 50 年経った現代において、初めて高分子超伝導の実験的検証が可能となり、本研究では 3 年間の研究計画で高分子超伝導を達成する。

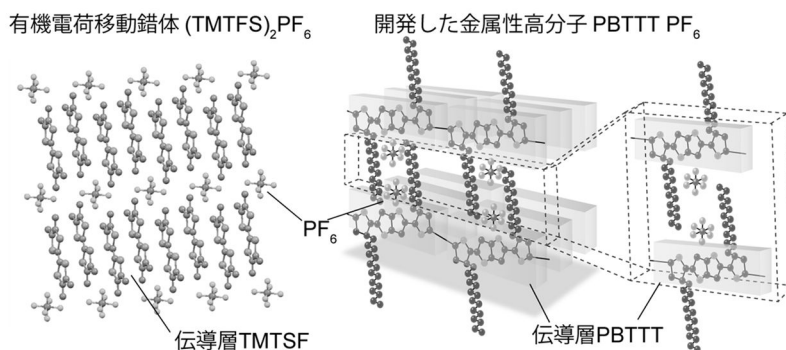


図 1 有機電荷移動錯体と金属性高分子の類似性

共役骨格(TMTFS または PBTTF)は、ドーパント PF₆ と空間的に分離した擬一次元の伝導チャンネルを形成している。ともに共役 1 ユニットあたり 1 個程度の電子が励起している。

機に、導入されたドーパント分子を精緻に配列させつつ、別種のドーパントにイオン交換することも可能となった。その結果、室温で縮退した電子状態を有する高分子薄膜を開発することに成功した。図 1 に有機電荷移動錯体 (TMTFS)₂ PF₆ と新規に開発した金属性高分子/PF₆ 複合体の結晶構造を示した。両材料ともに、電子の流れる伝導層がキャリアドーパント PF₆ 層と空間的に分離した積層構造が得られている。また両材料の室温における電気伝導度やその温度依存性も極めて類似することがすでに確かめられている。従って、新規に開発した高分子薄膜中では、超伝導を示す有機電荷移動錯体の有する電子状態と極めて類似した電子物性が期待できると言える。Little の予言から 50 年経った現代において、初めて高分子超伝導の実験的検証が可能となり、本研究では 3 年間の研究計画で高分子超伝導を達成する。

1. W. A. Little, Phys. Rev., A 134 (1964). 2. W. A. Little, Scientific American, 212, 21 (1965). 3. J. C. Phillips. Phys. Rev. Lett., 29, 1551 (1972). 4. C. G. Kuper, Phys. Rev. 150, 189 (1966). 5. D. Jerome, et al., J. Phys. Lett. 41, 4 (1980). 6. T. Ishiguro, et al, "Organic superconductor" (2013). 6. 田中一義, 化学 66, 10 (2010).

2. 研究の目的

本研究では、超分子化学・精密電子物性測定を駆使して、高分子を骨格とした超伝導体を実現する。本研究期間中に、超伝導転移の前兆である高分子の金属状態を実現するとともに、ゼロ抵抗現象とともに超伝導の特徴である完全反磁性状態の実験的観測を目指す。

3. 研究の方法

一次元性の共役高分子結晶とキャリアドーパント分子の高密度化を担保するために、共役骨格のねじれが抑制されたチオフェン系高分子 PBTTT: poly(2,5-bis(3-alkylthiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophene)をベンチマーク材料として用いる。PBTTT だけでなく、図 2 に示す新規なチオフェン材料の合成を実施する。ドナー材料候補として、あくまでも結晶性の担保に注力する理由は、超伝導の発現には(iii)高分子伝導骨格に縮退した電子系が必要不可欠であるためである。これらの材料群は、一般的な有機溶媒に可溶であることから、薄膜化が容易であり、電子物性測定に適している。

さらに、キャリアドーパント分子を選定し、結晶性高分子材料との複合化を行う。複合化に関しては、申請者が近年開発した固体膜におけるイオン交換法を用いる。本手法を用いることで、高分子骨格中にあらかじめ導入されたドーパント分子を 100%の変換効率で特定のイオン性分子と交換することが可能である(S. Watanabe, Nature, 572, 634 (2019))。本手法をコア技術として、ドーパントの系統的な調査を行う。超伝導状態を安

定させる上で、ドーパント種の静電相互作用が重要な役割を担うため、ドーパント種の系統的な調査は必要不可欠である。材料開発を迅速に進めるために、量子化学計算を用いた静電ポテンシャルの空間分布計算(分極性)を先行研究として実施しており(図 2)、イオン性分子のスクリーニングを迅速に実施することが可能である。得られた複合化材料の X 線構造解析および室温における電気抵抗率の測定から、さらに材料を選定し、低温電子物性実験を効率化する。

超伝導性の検証のために最も基本となる低温電気抵抗率計測を薄膜試料にて実施する。曖昧さのないゼロ抵抗の観測が新規超伝導体の検証には必要不可欠であるが、高分子薄膜は本質的に単結晶状態を形成できないことから、微結晶ドメイン内では超伝導現象が観測されるものの、マクロな電気抵抗率としてゼロ抵抗が現れない可能性がある。したがって、この微結晶ドメイン内の超伝導状態に敏感な磁化率測定を並行して行う。磁化率測定において、完全反磁性が観測されることは超伝導状態を観測していることに他ならない

4. 研究成果

(1) 新規ドーパント分子の合成とドーピング技術の開発

一次元性の共役高分子骨格とキャリアドーパント分子の高密度化を担保するために、共役骨格のねじれが抑制されたチオフェン系高分子 PBTTT をベンチマーク材料として用いて、共役高分子に伝導電子を導入するための化学ドーピングおよび、ドーパント分子の開発を行った。高分子半導体の 1 ユニット当たり 1 電荷に迫る高い電荷密度を実現するドーパント材料の開発に成功し(Adv. Sci. (2021))、さらに p 型・n 型ドーピングに的するドーパント材料の開発にも成功している(J. Mater. Chem. C (2021))。研究実施者が独自に開発したイオン交換型ドーピングに加えて、ラジカルカチオン酸化剤を用いた新規なドーピングルートを確認できた。ドーパント分子における酸化還元反応性と電荷補償のためのカウンターイオンの格納性の二つの機能性を分離することで、従来にはない新規なドーパント分子の設計が可能になった。高分子半導体だけでなく、有機半導体単結晶薄膜の表面のみを選択的にドーピングすることにも成功しており(Adv. Sci. (2020))、表面だけに電気伝導を有するセンサー素子としても利用可能であること

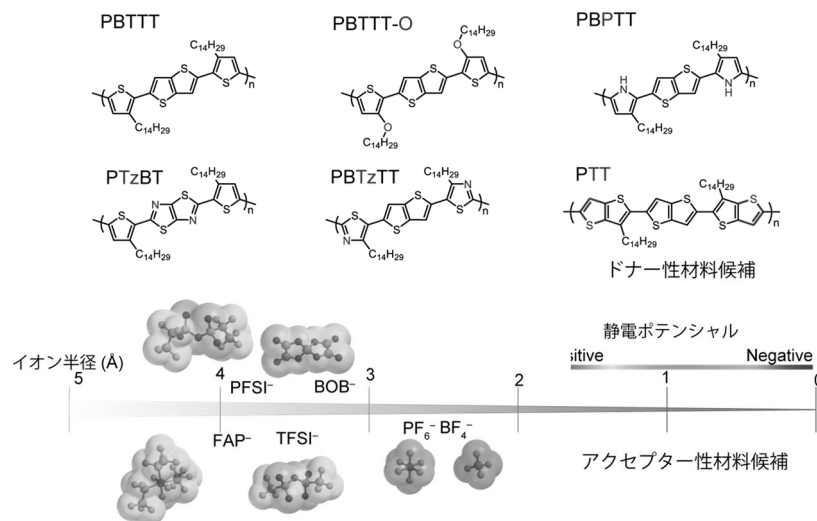


図 2 新規に合成するチオフェン系ドナー材料とアクセプター材料

を明らかにした。一次元性を有する共役高分子骨格中に存在する分子間空隙を対象し、この数ナノメートルサイズの空間で機能性分子・イオンを格納・脱離・交換する方法論を確立できたと言える。(図 3)

(2) 結晶性高分子半導体とドーパント複合体の構造解析

ドーパントを導入した PBTTT 薄膜構造を X 線散乱測定により評価したところ、面内方向の スタックおよび面外方向のラメラ構造に由来する Bragg ピークが観測され、未ドーパ時の結晶性構造が保たれていることが示された。ドーパント導入にともなって面外方向の格子定数は増加する一方、スタック間距離は 5% ほど減少し 3.5 \AA と短い値になった。これは隣接分子間の軌道重なり、および電子輸送に有利な特徴である。面外方向の X 線回折測定ではラメラ構造の周期性に対応する ($h00$) 回折が複数観測された(図 4b)。乱れた系では回折次数が大きいほど回折強度が弱くなるのが一般的であるが、ドーパ後の薄膜では (400) や (500) 回折が観測される一方で (300) 回折がほとんど観測されなかった。この特徴的な次数依存性に対応する結晶構造をシミュレーションしたところ、ドーパントの導入位置と密度を定量的に評価することに成功し、PBTTT モノマー 1 個当たり 1 個に近い密度のドーパントが規則的に導入されていることが示された(図 4)。超分子共結晶構造が薄膜中で均質に実現したことが、乱れの抑制と優れた伝導特性の実現に寄与していると考えられる(Commun. Mater. (2020))。

超分子共結晶造の上面図(図 4d)では、PBTTT のアルキル鎖が形成する周期的な空隙にドーパントが密に充填されていることがわかる。ドーパントと比較して三次元的に高いアニオンを用いた場合には、PBTTT のラメラ構造には導入できないのに対し、よりアルキル鎖が疎

な共役高分子のラメラ構造には導入可能ながわかってきている。すなわち、高分子薄膜の結晶性空隙はゲスト分子サイズに選択的な挙動を示しており、結晶性空隙および共結晶構造の設計という新しい観点が今後の材料開発に重要であると考えられる。密にアニオンが充填されたドーパ PBTTT では水などの不純物が拡散・吸着するサイトが減少するために大気安定性が向上することが示唆されており、共結晶構造は材料特性の制御に重要な役割を果たすと考えられる(Commun. Mater. (2021))。

(3) 導電性高分子の金属伝導性評価

磁場下における電気伝導測定では Hall 効果が観測され、高い移動度と 1 ユニット当たり 1 電荷に迫る高キャリア密度が確認された。Hall 移動度は弱い温度依存性を示し、2 K においても $1.4 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ の値を示した。これは従来に議論されてきたホッピング伝導とは明瞭に異なる挙動である。電子スピン共鳴測定からはドーピングによって生成されたキャリアが Pauli 常磁性に従うことが示された。これらは、イオン交換によって導入されたアニオンと高分子の鎖が規則正しく配列することで、電子が高分子の鎖内や鎖間で広がり、波のように振る舞うことを意味している。高分子という一般的には「乱れた系」に高密度の電荷が注入されるとクーロン相互作用によってキャリアは局在化すると予想され。しかしながら、高密度ドーピングによって二次元シート構造とその結晶性を保持したままに電荷を注入した場合には非局在電荷によるバンド伝導が生じ、half filled に迫る高キャリア密度において金属に近い状態が実現することが示された。乱れの観点では高分子のラメラ構造だけでなく、ドーパントの密度および配置の均質性も重要であると考えられる。一般的な高分子材料では、ドーパントはランダム性を有して導入され、著しい静電ポテンシャル揺らぎが生じる。本研究において酸化還元反応をきっかけにアニオン交換されたドーパントは薄膜に導入され、隣接アニオン間でのクーロン斥力を感じながら正に帯電した共役二次元シート構造に束縛される。また、あらかじめ形成された共役高分子の二次元シ

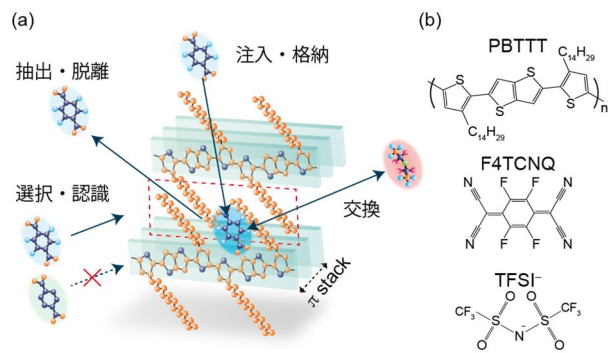


図 3 (a) 結晶性共役高分子の空隙における分子操作の概念

図. (b) 共役高分子およびドーパント分子の化学構造

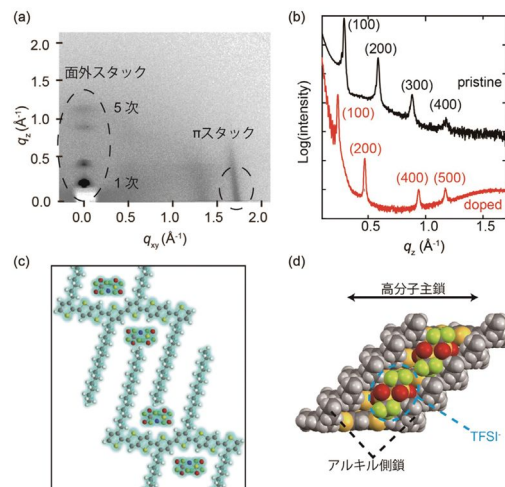


図 4 TFSI - ドープされた PBTTT 薄膜における (a) X 線散乱, (b) 面外方向 X 線回折測定結果, および超分子共結晶構造の (c) 側面図と (d) 上面図

ート構造に高密度なアニオンが導入される際の空間的な自由度は比較的少ないと考えられる。ドーパントが正に帯電した共役骨格に近づくような配置をとる場合に予想されるモデル構造を図 4(d)に示す。アルキル鎖の空隙はドーパントによって密に充填されており、構造の自由度は抑制されていることが分かる。実際、X線回折測定はこの予想と矛盾せず、そのピーク幅はドーピング後に小さくなる。すなわち結晶性が向上することが分かっている。ここで示すような規則的な空隙にドーパントを束縛した結晶性超分子構造が優れた電子機能性の発現に寄与していると考えられる。

高分子材料だけでなく、単結晶状態を形成する低分子材料にも着目し、その電子状態の制御と電子相転移の可能性を模索した。精緻に配列した低分子結晶表面に高密度にキャリアドーピングを施した結果、有機半導体では世界初となる金属絶縁体転移を観測することに成功し、結晶表面において二次元電荷ガスを形成・制御することが可能となった(Nat. Mater. (2021))。本結果は、分子の振動や欠陥などディスオーダーを有する系においても固体物理の予測する電子相転移が実現することを強く示唆し、超伝導転移の実現も可能であることが見出されつつある。また、プラスチック金属のナノディスクに関して、Linköping UniversityのMagnus Johnson教授と共同研究が進行し、顕著な成果が得られた(Commun. Mater.). 金属的な伝導を示すプラスチックがプラズモン共鳴体となることが実験的に検証でき、近赤外域のナノアンテナに応用できることが示された。

本研究の最終目的であった共役高分子材料の超伝導の実現は研究期間内には達成されなかったが、高分子の一軸配向技術とキャリアドーピング技術の双方に多大な成果が得られ、低温物性測定を継続することで電子相転移の可能性を模索する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Karki Akchheta, Yamashita Yu, Chen Shangzhi, Kurosawa Tadanori, Takeya Jun, Stanishev Vallery, Darakchieva Vanya, Watanabe Shun, Jonsson Magnus P.	4. 巻 3
2. 論文標題 Doped semiconducting polymer nanoantennas for tunable organic plasmonics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-022-00268-w	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 Kumagai Shohei, Ishii Hiroyuki, Watanabe Go, Yu Craig P., Watanabe Shun, Takeya Jun, Okamoto Toshihiro	4. 巻 55
2. 論文標題 Nitrogen-Containing Perylene Diimides: Molecular Design, Robust Aggregated Structures, and Advances in n-Type Organic Semiconductors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Accounts of Chemical Research	6. 最初と最後の頁 660 ~ 672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.accounts.1c00548	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 Ito Masato, Yamashita Yu, Mori Taizo, Ariga Katsuhiko, Takeya Jun, Watanabe Shun	4. 巻 119
2. 論文標題 Band mobility exceeding 10 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹ assessed by field-effect and chemical double doping in semicrystalline polymeric semiconductors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 013302 ~ 013302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0052279	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 Yamashita Yu, Jhulki Samik, Bhardwaj Dinesh, Longhi Elena, Kumagai Shohei, Watanabe Shun, Barlow Stephen, Marder Seth R., Takeya Jun	4. 巻 9
2. 論文標題 Highly air-stable, n-doped conjugated polymers achieved by dimeric organometallic dopants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 4105 ~ 4111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0TC05931E	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 Ito Masato, Yamashita Yu, Mori Taizo, Chiba Masaaki, Futae Takayuki, Takeya Jun, Watanabe Shun, Ariga Katsuhiko	4. 巻 38
2. 論文標題 Hyper 100 °C Langmuir-Blodgett (Langmuir-Schaefer) Technique for Organized Ultrathin Film of Polymeric Semiconductors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 5237 ~ 5247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.1c02596	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 Kasuya Naotaka, Tsurumi Junto, Okamoto Toshihiro, Watanabe Shun, Takeya Jun	4. 巻 20
2. 論文標題 Two-dimensional hole gas in organic semiconductors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Materials	6. 最初と最後の頁 1401 ~ 1406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-021-01074-4	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 Wei Xiaozhu, Kumagai Shohei, Sasaki Mari, Watanabe Shun, Takeya Jun	4. 巻 11
2. 論文標題 Stabilizing solution-processed metal oxide thin-film transistors via trilayer organic-inorganic hybrid passivation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035027 ~ 035027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0038128	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 Yamashita Yu, Tsurumi Junto, Kurosawa Tadanori, Ueji Kan, Tsuneda Yukina, Kohno Shinya, Kempe Hideto, Kumagai Shohei, Okamoto Toshihiro, Takeya Jun, Watanabe Shun	4. 巻 2
2. 論文標題 Supramolecular cocrystals built through redox-triggered ion intercalation in π -conjugated polymers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-021-00148-9	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 Kumagai Shohei, Makita Tatsuyuki, Watanabe Shun, Takeya Jun	4. 巻 15
2. 論文標題 Scalable printing of two-dimensional single crystals of organic semiconductors towards high-end device applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 030101 ~ 030101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac435a	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 Kurosawa Tadanori, Okamoto Toshihiro, Yamashita Yu, Kumagai Shohei, Watanabe Shun, Takeya Jun	4. 巻 8
2. 論文標題 Strong and Atmospherically Stable Dicationic Oxidative Dopant	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Science	6. 最初と最後の頁 2101998 ~ 2101998
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/advs.202101998	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 Ishii Hiroyuki, Kasuya Naotaka, Kobayashi Nobuhiko, Hirose Kenji, Kumagai Shohei, Watanabe Shun, Takeya Jun	4. 巻 119
2. 論文標題 Gate induced modulation of electronic states in monolayer organic field-effect transistor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 223301 ~ 223301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0058666	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 Kohno Shinya, Yamashita Yu, Kasuya Naotaka, Mikie Tsubasa, Osaka Itaru, Takimiya Kazuo, Takeya Jun, Watanabe Shun	4. 巻 1
2. 論文標題 Controlled steric selectivity in molecular doping towards closest-packed supramolecular conductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-020-00081-3	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 Watanabe Shun, Hakamatani Ryohei, Yaegashi Keita, Yamashita Yu, Nozawa Han, Sasaki Mari, Kumagai Shohei, Okamoto Toshihiro, Tang Cindy G., Chua Lay Lay, Ho Peter K. H., Takeya Jun	4. 巻 8
2. 論文標題 Surface Doping of Organic Single Crystal Semiconductors to Produce Strain Sensitive Conductive Nanosheets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Science	6. 最初と最後の頁 2002065 ~ 2002065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/advs.202002065	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 Kurosawa Tadanori, Okamoto Toshihiro, Cen Dinghai, Ikeda Daiji, Ishii Hiroyuki, Takeya Jun	4. 巻 54
2. 論文標題 Chrysenodithiophene-Based Conjugated Polymer: An Elongated Fused -Electronic Backbone with a Unique Orbital Structure Toward Efficient Intermolecular Carrier Transport	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 2113 ~ 2123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.0c00984	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 Yamashita Yu, Tsurumi Junto, Kurosawa Tadanori, Ueji Kan, Tsuneda Yukina, Kohno Shinya, Kempe Hideto, Kumagai Shohei, Okamoto Toshihiro, Takeya Jun, Watanabe Shun	4. 巻 2
2. 論文標題 Supramolecular cocrystals built through redox-triggered ion intercalation in -conjugated polymers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-021-00148-9	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 Ito Masato, Yamashita Yu, Tsuneda Yukina, Mori Taizo, Takeya Jun, Watanabe Shun, Ariga Katsuhiko	4. 巻 12
2. 論文標題 100 °C-Langmuir-Blodgett Method for Fabricating Highly Oriented, Ultrathin Films of Polymeric Semiconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 56522 ~ 56529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c18349	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山下 侑、鶴見 淳人、河野 真弥、黒澤 忠法、岡本 敏宏、渡邊 峻一郎、竹谷 純一
2. 発表標題 結晶性超分子構造を有する導電性高分子における高仕事関数と大気安定性の実現
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 雅人、山下 侑、森 泰蔵、竹谷 純一、渡邊 峻一郎、有賀 克彦
2. 発表標題 高温LB法を用いた高分子半導体の一軸配向超薄膜の作製と評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野 真弥、山下 侑、糟谷 直孝、三木江 翼、尾坂 格、瀧宮 和男、竹谷 純一、渡邊 峻一郎
2. 発表標題 結晶性導電性高分子における立体障害の影響と伝導特性
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

竹谷・岡本・渡邊研究室 http://www.organice1.k.u-tokyo.ac.jp/
--

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	黒澤 忠法 (Kurosawa Tadanori) (30720940)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教 (12601)	転出により分担者を辞退

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			
スウェーデン	Linkoping University			