

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02786

研究課題名(和文)世界最高の電子移動度を示す電子不足型有機半導体高分子の開発

研究課題名(英文) Development of Electron-Deficient Organic Semiconducting Polymers with Record High Electron Mobility

研究代表者

道信 剛志 (Michinobu, Tsuyoshi)

東京工業大学・物質理工学院・教授

研究者番号：80421410

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、窒素置換したベンゾビスチアジアゾール誘導体および関連する電子不足芳香環を利用して電子輸送型半導体高分子を合成し、世界最高レベルの電子移動度を有機トランジスタにおいて実現することを目的とした。まず、クロスカップリング重合の条件を最適化することで分子量10万程度のポリマーが高い移動度を示すことを明らかにした。次に縮環オリゴフェニレンビニレン誘導体やオキサゾールのような芳香族ユニットを用いると電子輸送特性に優れたポリマーが得られることを証明した。また、イオン性添加剤を活性層に加えると、半導体層と電極の間の接触抵抗が下がるためトランジスタ特性が向上することを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有機半導体高分子の研究において、正孔輸送型のp型半導体特性の最適化は比較的容易であるが、電子輸送特性に優れたn型半導体の設計は難易度が高いという問題があった。本研究において、電子輸送特性に影響を与える高分子の因子として、分子量や主鎖骨格の影響について明らかにした。例えば、チアゾールに比べてほとんど用いられていなかったオキサゾールは、電子輸送特性を有する骨格であり、直接アリアル化重縮合のような環境負荷が低い重合法で高分子を製造することができることを証明した。また、イオン性の添加剤を加えるという簡単な操作でトランジスタの極性やキャリア移動度を調節できるという新しい知見を得るに至った。

研究成果の概要(英文)：In this study, high-performance electron-transporting semiconducting polymers were developed by using nitrogen-substituted benzobisthiadiazole derivatives and related electron-deficient aromatic rings to achieve high electron mobilities in organic transistors. First, optimization of cross-coupling polymerization conditions produced high molecular weight polymers with the molecular weights of about 100,000. These polymers displayed excellent carrier mobilities. Next, the use of aromatic units, such as fused oligophenylenevinylene derivatives and oxazole, was shown to produce polymers with excellent electron transporting properties. It was also found that adding ionic additives to the active layer improves transistor performances because the contact resistance between the semiconductor layer and electrode is lowered.

研究分野：高分子科学

キーワード：有機半導体 半導体高分子 トランジスタ 太陽電池 有機エレクトロニクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

有機半導体高分子の研究は2000年にHeeger、MacDiarmid、白川がノーベル化学賞「導電性高分子の発見と応用」を受賞して以来、爆発的に増加したが、それらを用いた電子デバイスは未だ実用化されていない。主な要因は無機半導体である結晶シリコンを大きく凌駕するキャリア移動度と化学的安定性(特にn型)を達成できていない点にある。有望な化学構造は数多く報告されているが、その大部分はインジゴやジケトピロロピロール(DPP)等の既存の有機染料・顔料構造に基づいており、正孔を輸送するp型半導体特性を示す。一方、電子輸送を担うn型半導体高分子の報告例は未だ限られている。未開拓の有機染料・顔料の中には高性能なn型半導体材料が残されている可能性があり、新たな化学構造を探索する実験に基づく学術研究が強く望まれている。

2. 研究の目的

有機半導体高分子を用いたトランジスタは、非晶質シリコンを超える移動度を実現したが、さらなる移動度の向上を目指した競争が激化している。正孔を輸送するp型半導体高分子の研究は大きく進展しており、正孔移動度 $10\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ を超える高分子が報告されている。一方、電子を輸送するn型半導体高分子の研究は遅れており、電子移動度 $10\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ を超える高分子の設計は極めて難易度が高い状況にある。本研究では、n型半導体に関する分子設計とデバイス構造の創り込みを組合わせて、高分子トランジスタの電子移動度を向上させる方法論を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

(1)分子量の効果:有機半導体高分子は共役高分子とも呼ばれ、通常、クロスカップリング反応を用いた重縮合により合成される。クロスカップリング反応の機構を理解し、律速段階となる素反応の条件を改善することで、高分子量体を得る方法を確立する。

(2)主鎖骨格の効果:平面性が高い主鎖骨格は結晶性が高い薄膜になるため、電荷輸送特性に優れることが知られている。そのため、電子注入効率が高く、電子輸送性に優れた芳香族ユニットを探索し、それらを組み込んだ共役高分子の主鎖を決定する。以前の研究において、チアジアゾロベンゾトリアゾール誘導体が優れた電子輸送特性を示すことを見出しているため、この骨格に続く有望な芳香環構造を探索する。具体的には、オリゴフェニレンビニレン(OPV)のエステルおよびアミド縮環体やオキサゾールを調査対象として選択した。OPVのエステルおよびアミド縮環体はもともと電子輸送性骨格として報告がある。一方、オキサゾールはDFT計算より有望なアクセプター骨格として選択し、かつ直接アリール化重縮合に使用できるモノマーとして調査した。

(3)側鎖アルキル基の効果:側鎖アルキル基は高分子の有機溶媒への溶解性を担保するために導入されていたが、近年、基板上での配向制御に用いられている。アルキル鎖長を変えた誘導体を合成し、基板上での配向や結晶性を比較する。

(4)添加剤の効果:有機トランジスタの高分子半導体層にイオン性添加剤を少量加えると、側鎖アルキル基の配列を促し、結果として高分子薄膜の結晶性を向上させるという報告がある。本研究では、この結果を検証すると共に、キャリア移動度を向上させるための一般的な手法として確立することを目指した。具体的にはテトラアルキルアンモニウム塩を選択し、その添加量を変えることでトランジスタ特性へ与える影響を調査した。また、薄膜モルフォロジーへの影響をAFMやGIWAXS測定から評価した。さらに、トランスファーライン法を用いて半導体層と電極の間の接触抵抗を求め、トランジスタ特性に与える影響について考察した。

4. 研究成果

(1)まず、研究開始当初はベンゾビスチアジアゾール誘導体およびチアジアゾロベンゾトリアゾール誘導体の合成実験に取り組んでいたため、市販のベンゾチアジアゾールビスチオフェンをモノマーとして用いてクロスカップリング重合の条件検討を実施した。鈴木カップリング、菌頭カップリング、根岸カップリング、山本カップリング、Heckカップリングなど一連のクロスカップリング反応を用いた重合を試験し、Stilleカップリングの条件が最も高分子量体を生成しやすいという知見を得た。共モノマーとしてナフタレンジイミド(NDI)誘導体を固定し、Stilleカップリング重合の条件を検討した。通常使用していたトルエンからクロロベンゼンに溶媒を変えると、生成高分子の分子量が向上することが明らかになった。さらに、ヨウ化銅を少量添加するとトランスメタル化反応が加速され、分子量の向上につながることも実証した。このように種々条件を変えて合成した分子量が異なる半導体高分子に対して薄膜トランジスタを作製し、電荷輸送特性を調査した。その結果、分子量が増大して10万に近づくほど薄膜の結晶性とトランジスタの移動度が増加することが分かった。10万以上の高分子量子体では結晶性と移動度の物性が飽和する様子が見られたため、有機トランジスタに用いる半導体高分子の分子量は10万程度のものが望ましいと言える。最近、半導体高分子の分子量依存性を調査した別の報告によると、

繰返し単位で 40~50 ユニットの高分子が最も結晶性が高いと結論付けており、今回の結果と整合性があった[1]。

(2)次に、平面性が高い主鎖骨格の探索を実施した。チアジアゾロベンゾトリアゾール誘導体の共モノマーとして、正孔注入および正孔輸送を抑制できる骨格として NDI や縮環 OPV 誘導体を用いると電子注入と電子輸送特性に特化した半導体高分子となり、n 型のみで作動するトランジスタを実現できる。チアジアゾロベンゾトリアゾール誘導体と NDI の共重合においては、以前に使用していたトルエンよりも高沸点の溶媒であるクロロベンゼンを用いた方が高分子量体が得られ、紫外-可視-近赤外領域に広がった吸収を示したため、狭いバンドギャップを有することを確認した。電気化学測定したところ、酸化波は観測されなかったが、明確な還元波が現れ、電子注入特性に優れていることが示唆された。この挙動は、過去に報告された縮環 OPV を主鎖骨格に含む半導体高分子と同様であった[2]。ボトムゲートトップコンタクト型のトランジスタを湿式法で作製し、電荷輸送特性を評価したところ、電子輸送のみが観測され、n 型トランジスタとして作動することを証明した。また、薄膜を熱アニーリングすると結晶性が向上するため、移動度が改善されることを明らかにした。さらに、ビニレンスペーサーを導入すると立体障害が低下すると共に分子内水素結合によりモノマーの自由回転が抑制され、高分子主鎖の平面性が向上することが、薄膜の X 線回折測定や DFT 計算より明らかになった。

(3)NDI や縮環 OPV 骨格に基づく高い平面性と電子注入能が明らかになった。さらに、側鎖アルキル基を調節することで高分子鎖の基板上での配向を制御することに成功した。具体的には、高分子の繰返し単位に 2 種類のアルキル基を置換し、薄膜状態の X 線回折像を評価した。2 種類のアルキル鎖長がほとんど同じ時、面外方向への電荷輸送に適したフェイスオン型の配向が得られることが分かった。一方、2 種類のアルキル鎖長に差がある時、面内方向への電荷輸送に適したエッジオン型の配向が得られることが分かった。この挙動は、過去に報告された別の半導体高分子でも見られており、結晶性の共役高分子全般に適用できる分子設計であると言える[3]。

(4)また、新たな電子不足系共役スペーサー(および共モノマー)としてオキサゾール誘導体を調査した。以前の研究において、電子不足系のチアゾールをスペーサーとして用いると、非常に深い最低空軌道(LUMO)準位を有する半導体高分子が得られた[4]。LUMO 準位が深いと大気中の水分と副反応しなくなるため、大気安定性に優れた有機トランジスタを作製できる。本研究では、分子設計の幅を広げるため、チアゾールの硫黄原子を酸素原子に置換したオキサゾールを対象とした。DFT 計算より、イミダゾールやテトラゾールなどに比べてオキサゾールの LUMO 準位は深く、硫黄原子の位は直接アリアル化反応で活性点となり得る C-H 結合を有することが示唆された。そこで、従来法である Stille カップリングと直接アリアル化反応を両方試験し、結果を比較した。オキサゾールをブチルリチウムで処理後、トリブチルスズクロリドを反応させると選択的に置換オキサゾールが得られ、Stille カップリングでモノマー骨格を拡張することができた。上述の通りオキサゾール 2 位の C-H 結合は活性が高く、直接アリアル化重縮合により対応する半導体高分子を合成することができた。オキサゾールから成る高分子の LUMO 準位は-3.8eV と十分に深く、新たな電子輸送性高分子として有望であることが示された。

(5)薄膜トランジスタにおいて n 型作動の安定性を定量的に評価した。高分子は分子量が異なる分子の混合物であるため、対応する低分子モデルオリゴマーを合成し、分子量の影響を排除した。具体的には、両端に NDI を置換したベンゾチアジアゾールビスチオフェンとチアジアゾロベンゾトリアゾールビスチオフェン誘導体を比較した。いずれの薄膜トランジスタも n 型のみで作動したが、チアジアゾロベンゾトリアゾール誘導体の方が深い LUMO 準位を有するため、大気下で 1 ヶ月保管後でも電子移動度の低下は 20%程度に抑えられた。

(6)最後に、薄膜トランジスタの評価において少量添加剤によるドーピングの効果について検証した。テトラブチルアンモニウム塩のようなイオン性添加物を加えると、p 型またはアンバイポーラ型高分子の結晶性が向上し、トランジスタにおけるキャリア移動度が上昇する条件があることを見出した。この現象を科学的に説明するため、トランスファーライン法[5]を用いて有機半導体層と電極の界面を詳細に調査したところ、テトラブチルアンモニウム塩の添加によって接触抵抗が大幅に減少していることを見出した。

<引用文献>

- [1] D. K. Tran, A. Robitaille, I. J. Hai, C.-C. Lin, D. Kuzuhara, T. Koganezawa, Y.-C. Chiu, M. Leclerc, S. A. Jenekhe, *Chem. Mater.* **2022**, *34*, 9644-9655.
- [2] T. Lei, X. Xia, J.-Y. Wang, C.-J. Liu, J. Pei, *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136*, 2135-2141.
- [3] I. Osaka, M. Saito, T. Koganezawa, K. Takimiya, *Adv. Mater.* **2014**, *26*, 331-338.
- [4] Y. Wang, H. Guo, A. Harbuzaru, M. A. Uddin, I. A. Marcos, S. Ling, J. Yu, Y. Tang, H. Sun, J. T. L. Navarrete, R. P. Ortiz, H. Y. Woo, X. Guo, *J. Am. Chem. Soc.* **2018**, *140*, 6095-6108.
- [5] K. Shibata, H. Wada, K. Ishikawa, H. Takezoe, T. Mori, *Appl Phys. Lett.* **2007**, *90*, 193509.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件／うち国際共著 12件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Otep, K. Ogita, N. Yomogita, K. Motai, Y. Wang, Y.-C. Tseng, C.-C. Cheuh, Y. Hayamizu, H. Matsumoto, K. Ishikawa, T. Mori, T. Michinobu	4. 巻 54
2. 論文標題 Cross-linking of Poly(arylenebutadiynylene)s and Its Effect on Charge Carrier Mobilities in Thin Film Transistors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 4351-4362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.1c00008	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 X. Chen, T. Michinobu	4. 巻 223
2. 論文標題 Post-Polymerization Modification: A Powerful Tool for the Synthesis of Stimuli-Responsive Polymers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Macromol. Chem. Phys.	6. 最初と最後の頁 2100370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/macp.202100370	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 S. Otep, Y.-C. Tseng, N. Yomogita, J.-F. Chang, C-C. Chueh, T. Michinobu	4. 巻 10
2. 論文標題 Coil-Rod-Coil Triblock Copolymers Synthesized by Macromolecular Clicking and Their Applications for All-Polymer Solar Cells	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. C	6. 最初と最後の頁 346-359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1TC04948H	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. Jung, W. Li, J. Kim, T. Michinobu, M. Ree	4. 巻 125
2. 論文標題 n-Type Digital Memory Characteristics of Diketopyrrolopyrrole-Based Narrow Bandgap Polymers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. C	6. 最初と最後の頁 27479-27488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.1c08929	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 Q. Liu, W. He, Y. Shi, S. Otep, W. L. Tan, S. Manzhos, C. R. McNeill, X. Guo, P. Sonar, T. Michinobu, A. K. K. Kyaw	4. 巻 34
2. 論文標題 Directional Carrier Polarity Tunability in Ambipolar Organic Transistors Based on Diketopyrrolopyrrole and Bithiophene Imide Dual-Acceptor Semiconducting Polymers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chem. Mater.	6. 最初と最後の頁 3140-3151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemmater.1c04258	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. Wang, S. Otep, J. Kimpel, T. Mori, T. Michinobu	4. 巻 9
2. 論文標題 N-Type Charge Carrier Transport Properties of BDOPV-Benzothiadiazole-Based Semiconducting Polymers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 1604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electronics9101604	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 J. Kimpel, Y. Yoshitake, T. Michinobu	4. 巻 93
2. 論文標題 Poly(3,9-carbazole)s: A Chemically Stable Extended Form of Polyaniline for Nitro-Aromatic Sensor Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bull. Chem. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 1361-1365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20200177	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 K.-H. Tu, Y. Wang, Y. Kiyota, T. Iwahashi, Y. Ouchi, T. Mori, T. Michinobu	4. 巻 87
2. 論文標題 A Cyano-Rich Small Molecule Dopant for Organic Thermoelectrics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Org. Electron.	6. 最初と最後の頁 105986
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.orgel.2020.105978	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. Otep, Y.-C. Lin, H. Matsumoto, T. Mori, K.-H. Wei, T. Michinobu	4. 巻 87
2. 論文標題 Diketopyrrolopyrrole-Thiophene-Methoxythiophene Based Random Copolymers for Organic Field Effect Transistor Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Org. Electron.	6. 最初と最後の頁 105986
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.orgel.2020.105986	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. Tane, T. Michinobu	4. 巻 70
2. 論文標題 Cu(I)-Catalyzed Azide-Alkyne Cycloaddition Synthesis and Fluorescent Ion Sensor Behavior of Carbazole-Triazole-Fluorene Conjugated Polymers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polym. Int.	6. 最初と最後の頁 432-436
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pi.5976	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 J. Kimpel, T. Michinobu	4. 巻 70
2. 論文標題 Conjugated Polymers for Functional Applications: Lifetime and Performance of Polymeric Organic Semiconductors in OFETs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polym. Int.	6. 最初と最後の頁 367-373
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pi.6020	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 S. Otep, K. Ogita, N. Yomogita, K. Motai, Y. Wang, Y.-C. Tseng, C.-C. Cheuh, Y. Hayamizu, H. Matsumoto, K. Ishikawa, T. Mori, T. Michinobu	4. 巻 54
2. 論文標題 Cross-linking of Poly(arylenebutadiynylene)s and Its Effect on Charge Carrier Mobilities in Thin Film Transistors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 4351-4362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.1c00008	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 Y. Wang, T. Hasegawa, H. Matsumoto, T. Michinobu	4. 巻 58
2. 論文標題 Significant Difference in Semiconducting Properties of Isomeric All-Acceptor Polymers Synthesized via Direct Arylation Polycondensation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Angew. Chem. Int. Ed.	6. 最初と最後の頁 11893-11902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201904966	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 S. Otep, Y. Wang, A. Kohara, H. Matsumoto, T. Mori, T. Michinobu	4. 巻 1
2. 論文標題 Tuning Backbone Planarity in Thiadiazolobenzotriazole-Bis(thienothiophenyl)ethylene Copolymers for Organic Field-Effect Transistors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Appl. Polym. Mater.	6. 最初と最後の頁 2302-2312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsapm.9b00329	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 S. W. Kim, Y. Wang, H. You, W. Lee, T. Michinobu, B. J. Kim	4. 巻 11
2. 論文標題 Impact of Incorporating Nitrogen Atoms in Naphthalenediimide-Based Polymer Acceptors on the Charge Generation, Device Performance, and Stability of All-Polymer Solar Cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 35896-35903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b12037	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 K. Morita, T. Michinobu	4. 巻 257
2. 論文標題 Energy Level Tuning of Aromatic Polyamines by [2+2] Cycloaddition-Retroelectrocyclization for the Optimization of Device Performances	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Synth. Met.	6. 最初と最後の頁 116179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.synthmet.2019.116179	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 J. Dong, Y. Wang, T. Mori, T. Michinobu	4. 巻 59
2. 論文標題 Improving the Air-Stability of n-Type Organic Thin-Film Transistors by Polyacrylonitrile Additive	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 SDDC05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab5c4b	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 Q. Liu, Y. Wang, A. Kohara, H. Matsumoto, S. Manzhos, K. Feron, S. E. Bottle, J. Bell, T. Michinobu, P. Sonar	4. 巻 30
2. 論文標題 Tuning the Charge Carrier Polarity of Organic Transistors by Varying the Electron Affinity of the Flanked Units in Diketopyrrolopyrrole-Based Copolymers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Adv. Funct. Mater.	6. 最初と最後の頁 1907452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.201907452	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 C.-H. Chen, Y. Wang, T. Michinobu, S.-W. Chang, Y.-C. Chiu, C.-Y. Ke, G.-S. Liou	4. 巻 12
2. 論文標題 Donor-Acceptor Effect of Carbazole-Based Conjugated Polymer Electrets on Photo-Responsive Flash OFET Memories	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 6144-6150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b20960	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.-A. Su, N. Maebayashi, H. Fujita, Y.-C. Lin, C.-I. Chen, W.-C. Chen, T. Michinobu, C.-C. Chueh, T. Higashihara	4. 巻 12
2. 論文標題 Development of Block Copolymers with Poly(3-hexylthiophene) Segments as Compatibilizers in Non-Fullerene Organic Solar Cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 12083-12092
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b22531	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 Q. Liu, Y. Wang, Y. Ren, A. Kohara, H. Matsumoto, Y. Chen, S. Manzhos, K. Feron, S. E. Bottle, J. Bell, Y. Zhou, T. Michinobu, P. Sonar	4. 巻 2
2. 論文標題 Diketopyrrolopyrrole-Based Dual-Acceptor Copolymers to Realize Tunable Charge Carrier Polarity of Organic Transistors and High-Performance Non-Volatile Ambipolar Flash Memories	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Appl. Electron. Mater.	6. 最初と最後の頁 1609-1618
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00169	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. Tane, T. Michinobu	4. 巻 69
2. 論文標題 Cu(I)-Catalyzed Azide-Alkyne Cycloaddition Synthesis and Fluorescent Ion Sensor Behavior of Carbazole-Triazole-Fluorene Conjugated Polymers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polym. Int.	6. 最初と最後の頁 432-436
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pi.5976	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 J. Kimpel, T. Michinobu	4. 巻 69
2. 論文標題 Conjugated Polymers for Functional Applications: Lifetime and Performance of Polymeric Organic Semiconductors in OFETs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polym. Int.	6. 最初と最後の頁 367-373
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pi.6020	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 S. Otep, T. Michinobu, Q. Zhang	4. 巻 4
2. 論文標題 Pure Organic Semiconductor-Based Photoelectrodes for Water Splitting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sol. RRL	6. 最初と最後の頁 1900395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/solr.201900395	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17件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 J. Kimpel, B. J. Kim, T. Michinobu
2. 発表標題 Influence of Asymmetric Tether Regiochemistry on Direct Arylation Polymerisation Mechanism and Ultimate Charge Transfer Properties of NDI-Based Copolymers
3. 学会等名 MACRO2020+ (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Michinobu
2. 発表標題 Designing Conjugated Polymers for Transistor and Photovoltaic Applications
3. 学会等名 2021 International Conference on Modern Challenges in Polymer Science and Technology (MCPST) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 道信 剛志
2. 発表標題 半導体高分子の電荷輸送および近赤外発光に関する研究
3. 学会等名 第70回高分子討論会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊 菜々美、道信 剛志
2. 発表標題 NDIユニットから成る新規n型有機半導体の合成と物性評価
3. 学会等名 第11回CSJ化学フェスタ2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Michinobu
2. 発表標題 [2+2] Cycloaddition-Retroelectrocyclization Click Reaction for the Synthesis of Polymeric Donor-Acceptor Systems
3. 学会等名 2021 Materials Research Society-Taiwan International Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 J. Kimpel, Y. Wang, H. You, B. Kim, T. Michinobu
2. 発表標題 Influence of Asymmetric Tether Regiochemistry in Thienopyrroledione- and Naphthalenediimide-based Copolymers for Organic Thin Film Transistors and All-Polymer Solar Cells
3. 学会等名 Pacifichem 2021 Congress (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 W. He, T. Michinobu
2. 発表標題 Organic Field-Effect Transistor Memories Based on Layer-by-layer Processing Donor-Acceptor Polymer Electrets
3. 学会等名 Pacifichem 2021 Congress (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Otep Sultan、道信 剛志
2. 発表標題 有機半導体高分子の主鎖平面性とトランジスタ特性の相関
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾山 泰輝、道信 剛志
2. 発表標題 [2+2]付加環化反応を用いた新規n型有機半導体の合成
3. 学会等名 第10回CSJ化学フェスタ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 蓬田 直正、Otep Sultan、道信 剛志
2. 発表標題 ポリスチレンを両端にもつポリアリーレンブタジニレンの合成
3. 学会等名 第10回CSJ化学フェスタ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 蓬田 直正、Otep Sultan、道信 剛志
2. 発表標題 両端にポリスチレンを導入したABA型トリブロック共重合体の合成
3. 学会等名 2020年繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Michinobu
2. 発表標題 The [2+2] Cycloaddition-Retroelectrocyclization (CA-RE) Click Reaction for the Synthesis of Polymeric Push-Pull Chromophores
3. 学会等名 Glowing Polymer Symposium in KANTO (GPS-K) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 道信 剛志
2. 発表標題 n型半導体高分子の開発とトランジスタ応用
3. 学会等名 ICPST-36 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Otepov, T. Michinobu
2. 発表標題 Photoelectrocatalytic Application of Thiadiazolobenzotriazole and Bis(thienothiophenyl)ethylene Based Donor-Acceptor Conjugated Polymers
3. 学会等名 10th International Conference on Molecular Electronics & BioElectronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. H. Dong, Y. Wang, T. Michinobu
2. 発表標題 Improving the Air-Stability of n-Type Organic Thin-Film Transistors by Additive Polyacrylonitrile
3. 学会等名 10th International Conference on Molecular Electronics & BioElectronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Michinobu
2. 発表標題 Metal-Free Click Chemistry for the Synthesis of Functional Polymers
3. 学会等名 FAPS 2019 Polymer Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 C.-H. Chen, C.-Y. Ke, Y. Wang, T. Michinobu, Y.-C. Chiu, G.-S. Liou
2. 発表標題 Novel Photo-Induced Recovery of OFET Memories Based on Coplanar Donor-Acceptor Polymer Electret for Photo-Recorder Application
3. 学会等名 FAPS 2019 Polymer Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Y. Zhou, S.-T. Han	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Royal Society of Chemistry	5. 総ページ数 446
3. 書名 Ambipolar Materials and Devices	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京工業大学 道信研究室 http://www.op.titech.ac.jp/lab/michinobu/jp/index.html

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