

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H02047

研究課題名（和文）励起子生成効率200%を示す近赤外有機EL素子の創成

研究課題名（英文）Organic light-emitting diodes possess 200% exciton production efficiency

研究代表者

中野谷 一（Nakanotani, Hajime）

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90633412

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、(1) 熱活性化遅延蛍光（TADF）過程の利用、(2) 一重項励起子開裂（SF）過程の二つの異なるスピントランス機構を融合することで、有機EL素子（OLED）における励起子生成効率の飛躍的な向上を目標とした。本研究期間中に、SF過程を示す分子をOLEDに組み込むことで、励起子生成効率が100%を超える世界初のSF型OLEDを実現した。また、TADF過程の基礎物理を、実験・理論の両側面から明らかにし、実用的なアプリケーションにも適用可能な高効率・高耐久性なNIR-OLEDの開発にも成功した。本研究課題を通じ、「励起子生成効率200%を示すOLED」の実現可能性が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題において、SF過程を示す分子をOLEDにおけるホスト材料として用いることで、励起子生成効率が100%を超える世界初のSF型OLEDを実現した。また、TADF過程の基礎物理を明らかにした。そしてこれらの学術的知見を基に、TADF過程とSF過程という二つの異なるスピントランス機構を融合することで、従来信じられていた励起子生成効率の理論限界値を超えることができる可能性を見出した。これにより、OLEDの特徴を生かしつつ、その発光強度は飛躍的に向上し、これまで想定されてきた用途のみならず、センサ光源や通信用光源等の新たな有機エレクトロニクス分野の学術・産業領域を開拓・創成できると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to dramatically improve the exciton generation yield in organic light-emitting diode (OLED) by fusing two different spin conversion mechanisms: (1) thermally-activated delayed fluorescence (TADF), and (2) singlet fission (SF) processes. During this research project, the world's first SF-type OLED that exhibits over 100% exciton generation yield was realized by incorporating molecules showing SF into the OLED. Further, the basic physics of the TADF process was clarified from both experimental and theoretical aspects, and we succeeded in developing a highly efficient and durable NIR-OLED that can be applied to practical applications. Through this research project, the feasibility of "OLED exhibiting exciton generation yield of 200%" was obtained.

研究分野：有機光エレクトロニクス

キーワード：有機EL 一重項励起子開裂 近赤外有機EL 熱活性化遅延蛍光

1. 研究開始当初の背景

近赤外域 (700~2000 nm) の光は、生体に対する透過性や非侵襲性、および大気に対する低光散乱特性などの特長を有している。そのため、発光ダイオード (LED) や受光素子の高性能化と併せ、生体センシング・測距技術・光通信など幅広い用途で応用され、我々の生活において身近な存在となっている。特に近赤外光を利用した光電式脈波測定や血中酸素飽和度測定は、日常生活における生体情報のモニタリング手法としても近年ますます大きな注目を集めている。

一方、有機 EL 素子 (OLED) は、高い EL 発光効率・軽量・柔軟など優れた特長を有しているため、ディスプレイとして既に実用化に至った。OLED の EL スペクトルは、分子により決定されるため、適切な分子を利用することで紫外~近赤外 EL を示すこともできる。そのため、近赤外 EL を示す OLED の実現は、表示デバイスとしての価値だけでなく、センシング光源としての新たな可能性を開拓できると期待される。しかし、近赤外 OLED の研究例は未だ少なく、発光出力強度などの諸特性も実アプリケーションに適用するには程遠い。OLED の優れた特長を活かした近赤外 OLED の実現は、新規アプリケーションの創出に向けて必須であり、材料化学およびデバイス物理に立脚した近赤外 OLED の包括的な設計指針の確立が強く求められている。

OLED の内部 EL 量子効率、室温燐光や熱活性化遅延蛍光 (TADF) 過程など、三重項励起子を発光として利用可能な励起子過程を利用することで、理論限界である 100% を達成できる。燐光材料では、内部重原子効果により強いスピン-軌道相互作用が発現する結果、室温でも燐光が得られる。TADF 材料では、電子供与部位と電子受容部位との間に立体捻じれなどを導入し、最高被占軌道 (HOMO) と最低空軌道 (LUMO) を空間的に分離させることで逆項間交差 (RISC) が発現し、遅延蛍光として三重項励起子を利用できる。しかし、近赤外 OLED の更なる高性能化のためには、室温燐光や TADF 過程に留まらない励起子過程を開拓することが必要である。

2. 研究の目的

室温燐光や TADF を利用することで、近赤外 OLED でも理想的な励起子生成効率が得られると期待される。しかし、OLED の励起子生成効率の理論上限は 100% であり、近赤外 OLED のさらなる高効率化・高出力化を目指す上では、全く新たな視点で、新規の励起子機構を開拓する必要がある。すなわち、信じられている理論限界値を超えることができれば、低消費電力性を保ちつつ、その発光強度は飛躍的に向上し、これまで想定されてきた照明素子等の用途のみならず、センサ光源や通信用光源等の新たな有機エレクトロニクス分野の学術・産業領域を開拓・創成できると期待される。

そこで本研究では、有機分子における多重励起子生成過程である“一重項励起子開裂 (singlet fission: SF)”と、TADF 過程を融合することに着目した。SF 過程は、 S_0 状態にある分子と S_1 状態にある分子が相互作用することで、二つの T_1 状態を生成する過程 ($S_1 + S_0 \rightarrow T_1 + T_1$) である。すなわち、電荷再結合において 25% の割合で生成する一重項励起子を開裂させることで、OLED における励起子生成効率の理論上限は 125% に到達すると期待できる。SF 過程は、特に有機薄膜太陽電池の性能向上を目的とした研究が活発に行われている。しかし、OLED における SF 過程の利用は前例がない。一方、TADF 分子から蛍光分子へのエネルギー移動過程を利用することで、励起子生成効率 100% で蛍光分子から EL 発光を得ることが可能である。これら SF 過程と TADF 過程の特

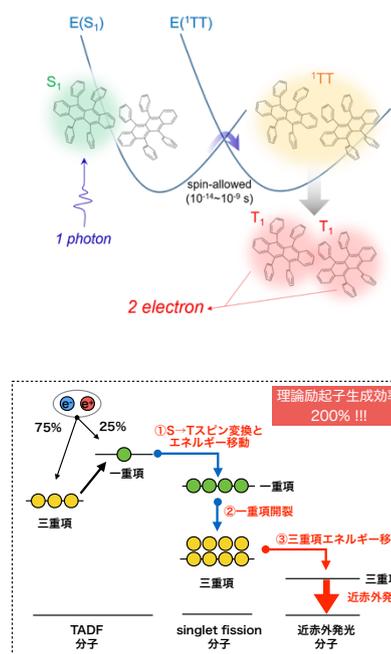


図 1 : SF 過程の概略図 (上) と、本研究提案の概要

徴を生かし、1) TADF 分子から SF 分子へのエネルギー移動、2) SF 分子における SF 過程、3) 近赤外分子へのエネルギー移動を融合し、励起子生成効率 200%を示す究極の有機 EL 素子を実現することを目的として、研究を実施した。

3. 研究の方法

本研究目標を達成するために、1) SF 過程を利用した近赤外有機 EL 素子の実証、2) 高効率 TADF 分子におけるスピン変換機構の解明、3) 励起子生成効率 200%を示す近赤外有機 EL 素子の創成、の研究課題に焦点を絞って研究を実施した。SF 型 OLED に関する研究では、効率的な SF 過程を示す 5,6,11,12-tetraphenylanthracene (rubrene) をホスト材料とした。また、近赤外発光材料として、tris-(8-hydroxyquinolino)erbium(III) (ErQ₃) を用いた。TADF 分子におけるスピン変換機構の解明では、高効率 TADF を示す 2,4,5,6-tetra-(9H-carbazol-9-yl)isophthalonitrile (4CzIPN) をモデル化合物として選定し、実験・理論両側面から研究を進めた。SF 過程と TADF 過程を融合する場合、SF 分子へと効率的にエネルギーを移動させるため、赤色もしくは近赤外領域で高発光効率を示す TADF 分子を開発する必要がある。そこで、dibenzo[a,c]phenazine-2,3,6,7-tetracarbonitrile (PZTCN) に着目し、新規近赤外 TADF 材料の開発を実施した。

4. 研究成果

1) SF 過程を利用した励起子生成効率 125%を示す近赤外有機 EL 素子の実証

Rubrene 単膜の発光スペクトルと ErQ₃ 溶液における吸収スペクトルとの間に重なりは存在しないことを確認した。これは、rubrene の S₁ 状態から ErQ₃ 分子の S₁ 状態への FRET 型エネルギー移動速度定数が著しく小さいことを意味している。図 2(a)に、ErQ₃ を 2mol% の濃度でホスト材料に分散させた共蒸着薄膜の近赤外 PL スペクトルを示す。この測定では、SF ホスト分子のみが選択的に励起される励起波長 (514 nm) を用いているが、1530 nm に発光ピークを示す ErQ₃ 分子由来の発光が観測された。これは、これらの共蒸着薄膜において、FRET 過程とは異なるエネルギー移動過程を経て ErQ₃ 分子の発光が観測された事実を示している。図 2(b)に、rubrene 単膜および TBRb 単膜における可視発光強度の磁場依存性測定の結果を示す。磁場印加に伴い、rubrene 単膜において S₁ 状態に由来する可視発光強度の増大が顕著に観測された。SF 過程では磁場印加に伴って、SF 過程を介する一重項性の三重項励起子対: ¹(TT)の生成が抑制される、すなわち、SF 過程が阻害される。図 2(c)に、ErQ₃-rubrene 薄膜における可視・近赤外発光強度の磁場依存性測定の結果を示す。磁場印加に伴い、rubrene 分子の S₁ 状態に由来する可視発光強度の増大と、ErQ₃ 分子に由来する近赤外発光強度の減少が観測された。すなわち、ErQ₃ の発光は、SF 過程を経由していると結論できる。

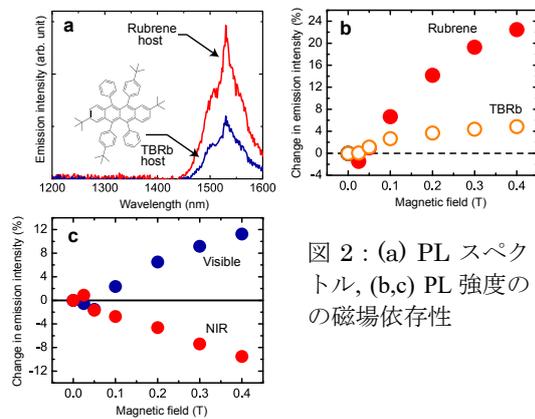


図 2 : (a) PL スペクトル, (b,c) PL 強度の磁場依存性

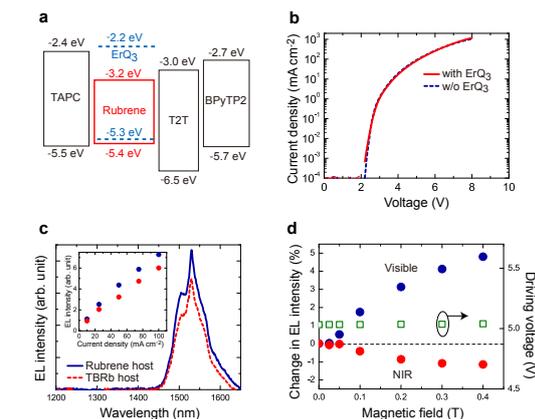


図 3 : (a) 素子構造, (b,c) OLED の IV 特性と EL スペクトル, (d) EL 強度の磁場依存性

次に ErQ₃-rubrene 薄膜を用いて SF 型 OLED の検討を行った。図 3(a)に作製した近赤外 SF-OLED の素子構造を、図 3(b)に電流密度-電圧特性を示す。rubrene 素子および ErQ₃-rubrene 素子における電流密度-電圧特性を比較すると、立ち上がり電圧および駆動電圧の一致が見られ、SF ホスト: (rubrene) 分子上で主に電荷再結合が生じていることが確認された。図 3(c)に、ErQ₃-

rubrene 素子および ErQ₃-TBRb 素子の、50 mA/cm²における近赤外 EL スペクトルを示す。ErQ₃-rubrene 素子では、ErQ₃-TBRb 素子の約 1.4 倍程度高い近赤外 EL 強度が得られた。図 3(d)に、定電流駆動における ErQ₃-rubrene 素子の可視・近赤外発光強度ならびに駆動電圧の磁場依存性測定の結果を示す。Rubrene 分子に由来する可視発光強度の増大と、ErQ₃ 分子に由来する近赤外発光強度の減少が観測された。これは光励起の場合と同様に、ErQ₃-rubrene 素子中で、rubrene 分子における SF 過程により生成した三重項励起子が、ErQ₃ 分子へとエネルギー移動して近赤外発光に至っていることを示している。また、可視・近赤外発光強度の変化割合から算出される励起子生成効率は 100.8%であり、SF 過程の利用により従来の理論限界 100%を上回る励起子生成効率が実現可能であることを実証した。(代表的な研究成果論文: Adv. Mater., 30, 1801484 (2018))

2) 高効率 TADF 分子におけるスピン変換機構の解明

4CzIPN および 5CzBN 分子の基本的な光学物性評価より、4CzIPN の RISC 速度定数 (k_{RISC}) は 5CzBN の k_{RISC} と比較して 4 倍程度大きい、5CzBN の ISC 速度定数 (k_{ISC}) は 4CzIPN に比べ逆に効率的に進行していることが判明した。ISC と RISC 過程は競合過程であり、 k_{ISC} と k_{RISC} は対応するべきである。しかし、これらの実験事実は、両分子におけるスピン変換過程が大きく異なることを示唆している。両分子におけるスピン変換過程を理解するため、各分子の k_{ISC} および k_{RISC} の温度依存性を評価した (図 4(a))。両分子ともに低温になるに従い k_{RISC} は低下する (図 4(b))。一方、ISC 過程において 5CzBN は温度依存性を示さなかったものの、4CzIPN は温度上昇とともに明確に k_{ISC} が増加した (図 4(c))。この事実は、4CzIPN における ISC 過程は熱活性的にある中間遷移状態を介して行われていることを意味する。

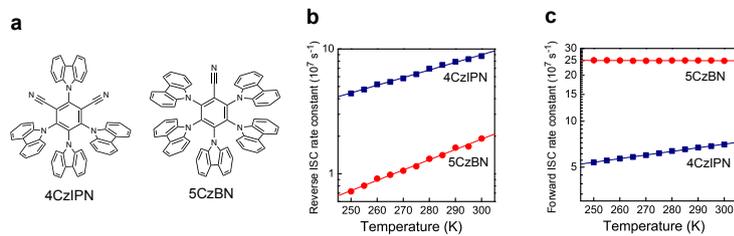


図 4: (a) 分子構造, (b,c) RISC および ISC 過程におけるアレニウスプロット

続けて量子化学計算を行った (図 5)。構造最適化した S₁ 状態において、4CzIPN の S₁ は CT 状態 (¹CT₁) を形成していることが分かった。T₂ 状態での電子分布は、LE 性と CT 性が混合した状態 (³HLCT₂) と同定した。また T₁ 状態の正孔分布は p-位に連結した二つの Cz 基 (2-Cz、5-Cz 間) に分布しており、CR 状態 (CR-³HLCT₁) を形成していると結論できる。次に、4CzIPN の分子振動に注目した。DFT 計算結果より、4,5,6 位の Cz 基は変化しないが、2 位の Cz 基のみ二面角が変化可能なが分かった。この分子振動による電子状態の変化を、2-Cz 基とベンゼン環の二面角 (ϕ_1) を変化させ評価した結果、 $\phi_1 = 145^\circ$ の時、2-Cz と 5-Cz 間の平面性が向上するため、S₁ 状態では電子状態が ¹CT₁ から CR 状態

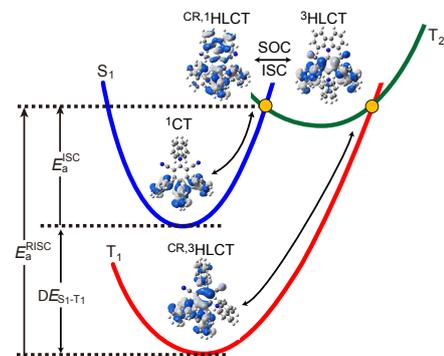


図 5: 提案する 4CzIPN 分子におけるスピン変換機構

(CR-¹HLCT) へと変化する。一方で、T₂ 状態では、電子状態は ϕ_1 に依存することなく ³HLCT₂ を示した。従って 2-Cz 基の分子振動の結果、S₁-T₂ 間ポテンシャル交差点において電子状態分布が大きく異なる。そのため、4CzIPN では S₁-T₂ 間でスピン変換が効率的に進行すると考えられる。

これらの実験的および理論的結果から、効率的なスピン変換を示す TADF 分子では、その部分構造分子の電子構造に対応する高次三重項励起状態がスピン変換過程における中間遷移状態として機能すると結論する (図 5)。S₁ および T₁ 準位に対して中間遷移状態となる高次三重項励起状態のエネルギーを制御することは、 k_{ISC} だけでなく k_{RISC} を制御する鍵となる。我々が提案するメカニズムは、³CT と ³LE の間のスピン振動相互作用による ISC 過程の

理論に矛盾せず、むしろ今まで説明不可能であった分子を説明することが可能である。従って本機構は、純粋な CT 型分子のスピントランス過程の包括的な理解につながり、今後の TADF 分子設計において重要な知見を提供できると期待される。(代表的な研究成果論文: Nature Materials 18, 1084–1090 (2019))

3) 高効率近赤外 OLED の開発

最終目標の達成に向けては、高い PLQY と効率的な RISC を示す近赤外 TADF 材料の開発が必要不可欠である。そこで近赤外 TADF 材料 (TPA-PZTCN) を設計し、その光学・OLED

特性を評価した。図 6(a)に TPA-PZTCN の HOMO-LUMO 分布を示す。図 6(b)には、TPA-PZTCN のトルエン溶液・共蒸着薄膜における吸収・PL スペクトルを示す。トルエン溶液および 1wt%共蒸着薄膜において、670 nm 付近に発光が観測され、80%程度と高い PLQY が得られた。さらに 10wt%共蒸着薄膜においても、PL ピークが 729 nm へと長波長化するにも関わらず、40%を超える PLQY が得られた。図 6(c)に、10wt%-TPA-PZTCN-mCBP 薄膜における過渡 PL 減衰の温度依存性測定の結果を示す。200 ~ 300K の温度域において遅延成分が観測され、TPA-PZTCN 分子の TADF 特性を確認した。また k_{RISC} は $7.6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ と算出された。これは報告されている近赤外 TADF 分子の k_{RISC} と比較して 2桁程度大きな値である。さらに、700 nm 帯で高効率の近赤外発光および RISC 過程を示す TPA-PZTCN は、900 nm 帯の近赤外蛍光材料: BBT-TPA に対する TADF アシストドープメントとしても利用可能である。

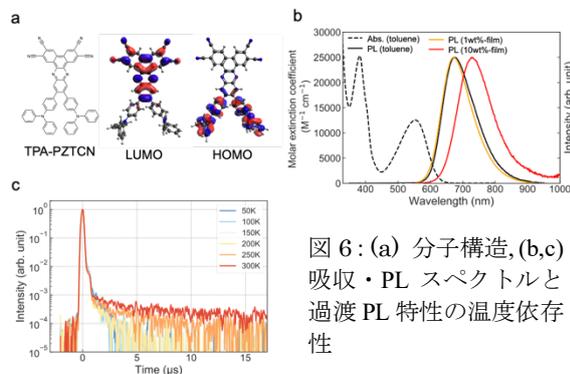


図 6: (a) 分子構造, (b,c) 吸収・PL スペクトルと過渡 PL 特性の温度依存性

実際に、1wt%-BBT-TPA-10wt%-TPA-PZTCN-mCBP 共蒸着薄膜において、BBT-TPA 分子に由来する 874 nm にピークを有する近赤外発光が観測され、PLQY も 12.9% という高い値が得られた。

次に、10wt%-TPA-PZTCN-mCBP 共蒸着薄膜を発光層とする 2 種類の OLED (TADF-OLED: BBT-TPA なし、TAF-OLED: BBT-TPA あり) を作製し、OLED 特性の評価を行った。図 7 に各素子の (a) EL スペクトルと電流密度-電圧 (b)、EQE-電流密度特性 (c) を示す。作製した TADF-OLED と TAF-OLED は、それぞれ 734 nm と 901 nm をピークとする EL を示し、最大 EQE は 13.4%、1.1% であった。これらは、近赤外 TADF-OLED の EQE としては、各波長域における最高値である。また TAF-OLED に関しては、10 mA/cm² の定電流駆動においても、LT95 > 600 時間という良好な素子耐久性を有することが明らかとなった。(代表的な研究成果論文: Angew. Chem., 60, 8477 (2021))

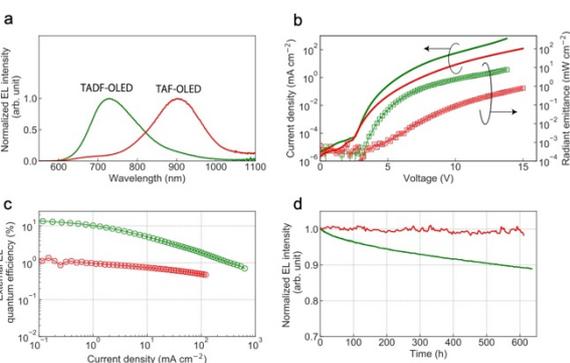


図 7: 作製した NIR-OLED の素子特性

4) まとめと今後の展開

本研究により、世界初の SF 型 OLED を実現した。また、TADF 過程におけるスピントランス機構の基礎的な物理を明らかにするとともに、実用化に近い高効率・高耐久性な NIR-OLED の開発にも成功し、「励起子生成効率 200%を示す OLED」の実現可能性が得られた。今後、本研究課題で得られた学術的知見を基盤とし、本研究をさらに発展させ「励起子生成効率 200%を示す OLED」の実現を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ueda Yuuhi, Nakanotani Hajime, Hosokai Takuya, Tanaka Yuya, Hamada Hokuto, Ishii Hisao, Santo Shuhei, Adachi Chihaya	4. 巻 8
2. 論文標題 Role of Spontaneous Orientational Polarization in Organic Donor-Acceptor Blends for Exciton Binding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2000896 ~ 2000896
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202000896	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 Balijapalli Umamahesh, Nagata Ryo, Yamada Nishiki, Nakanotani Hajime, Tanaka Masaki, D'Aleo Anthony, Placide Virginie, Mamada Masashi, Tsuchiya Youichi, Adachi Chihaya	4. 巻 60
2. 論文標題 Highly Efficient Near Infrared Electrofluorescence from a Thermally Activated Delayed Fluorescence Molecule	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 8477 ~ 8482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202016089	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 Nakanotani Hajime, Tsuchiya Youichi, Adachi Chihaya	4. 巻 Advance Publication
2. 論文標題 Thermally-activated delayed fluorescence for light-emitting devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200915	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 Tanaka Masaki, Nagata Ryo, Nakanotani Hajime, Adachi Chihaya	4. 巻 1
2. 論文標題 Understanding degradation of organic light-emitting diodes from magnetic field effects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 18-1~18-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-020-0019-0	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 Hiroki Noda, Xian-Kai Chen, Hajime Nakanotani, Takuya Hosokai, Momoka Miyajima, Naoto Notsuka, Yuuki Kashima, Jean-Luc Bredas, Chihaya Adachi	4. 巻 18
2. 論文標題 Critical role of intermediate electronic states for spin-flip processes in charge-transfer-type organic molecules with multiple donors and acceptors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Materials	6. 最初と最後の頁 1084-1090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-019-0465-6	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 Masaki Saigo, Kiyoshi Miyata, Seiichi Tanaka, Hajime Nakanotani, Chihaya Adachi, Ken Onda	4. 巻 10
2. 論文標題 Suppression of Structural Change upon S1-T1 Conversion Assists the Thermally Activated Delayed Fluorescence Process in Carbazole-Benzotrile Derivatives	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 2475-2480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.9b00810	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 Takahiko Yamanaka, Hajime Nakanotani, Chihaya Adachi	4. 巻 10
2. 論文標題 Slow recombination of spontaneously dissociated organic fluorophore excitons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5748-1~5748-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-13736-8	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 Naoto Notsuka, Hajime Nakanotani, Hiroki Noda, Kenichi Goushi, Chihaya Adachi	4. 巻 11
2. 論文標題 Observation of Nonradiative Deactivation Behavior from Singlet and Triplet States of Thermally Activated Delayed Fluorescence Emitters in Solution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 562-566
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.9b03302	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 Thanh Ba Nguyen, Hajime Nakanotani, Takuji Hatakeyama, Chihaya Adachi	4. 巻 32
2. 論文標題 The Role of Reverse Intersystem Crossing Using a TADF Type Acceptor Molecule on the Device Stability of Exciplex Based Organic Light Emitting Diodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 1906614-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.201906614	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 Nagata Ryo, Nakanotani Hajime, Potscavage William J., Adachi Chihaya	4. 巻 30
2. 論文標題 Exploiting Singlet Fission in Organic Light-Emitting Diodes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 1801484 ~ 1801484
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.201801484	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 Noda Hiroki, Nakanotani Hajime, Adachi Chihaya	4. 巻 4
2. 論文標題 Excited state engineering for efficient reverse intersystem crossing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaao6910-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aao6910	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 Noda Hiroki, Nakanotani Hajime, Adachi Chihaya	4. 巻 48
2. 論文標題 Highly Efficient Thermally Activated Delayed Fluorescence with Slow Reverse Intersystem Crossing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 126 ~ 129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.180813	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7件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 中野谷 一
2. 発表標題 有機CT励起状態が切り拓く多彩な有機光エレクトロニクス
3. 学会等名 高分子討論会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Nakanotani
2. 発表標題 Manipulation of the spin-flip process toward to development of high-performance organic light-emitting devices
3. 学会等名 CEMS Topical Meeting（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Nakanotani
2. 発表標題 Organic light-emitting devices with E-type delayed fluorescence emitters
3. 学会等名 THE 25th INTERNATIONAL WORKSHOP ON ACTIVE-MATRIX FLATPANEL DISPLAYS AND DEVICES（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hajime Nakanotani
2. 発表標題 熱活性化遅延蛍光分子における項間交差過程の理解
3. 学会等名 光化学討論会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hajime Nakanotani
2. 発表標題 High-performance organic light-emitting devices with E-type delayed fluorescence emitters
3. 学会等名 KJF- ICOMEP 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hajime Nakanotani
2. 発表標題 有機分子における項間交差過程の理解:高性能有機ELの実現に向けて
3. 学会等名 高分子学会 有機エレクトロニクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hajime Nakanotani
2. 発表標題 Manipulation of spin-flip process toward to development of high-performance organic light-emitting devices
3. 学会等名 International Conference on Display Technology 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本化学会	4. 発行年 2021年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 212
3. 書名 未来を拓く多彩な色素材料	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 化合物、発光材料、遅延蛍光材料および有機発光素子	発明者 Uma, 永田, 土屋, 中野谷, 安達	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-184095	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------