

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03902

研究課題名(和文)熱活性化遅延蛍光材料におけるスピン反転メカニズムの解明とその制御

研究課題名(英文)The mechanism and control of spin flips in thermally activated delayed fluorescence emitters

研究代表者

小林 隆史(Kobayashi, Takashi)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10342784

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,700,000円

研究成果の概要(和文)：一部の熱活性化遅延蛍光(TADF)材料で実現している高速なスピン反転は、高次の三重項励起状態(T_n)が密接に関与していると予想されている。本研究では、その深い理解を得るために、 T_n の実験的な証拠を収集することを目的とした。実験手法としては過渡発光測定と時間分解発光スペクトル測定を中心に据え、実験結果の解析法の整備や実験結果に悪影響を及ぼす一重項・三重項対消滅や三重項・三重項対消滅への対策、電荷再結合による長寿命発光成分の存在やダイマーやaggregateの影響などを明らかにし、最終的に T_n のエネルギーレベルの決定や性質の特定が可能なることを示すとともに、いくつかのTADF材料に適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

TADF材料は低コストで高効率な有機EL素子を実現する発光材料として現在でも積極的に研究開発が進められている。また燐光発光材料に比べて材料設計の自由度が高いこともその魅力の一つとなっている。その自由度の高さを最大限に生かすためにも、高効率TADF材料の合理的な設計指針が不可欠であり、その鍵が T_n に他ならない。本研究で構築した解析法や得られた知見に加え、 T_n に関する実験的証拠はこれらに大きく貢献するものと期待できる。

研究成果の概要(英文)：The fast spin-flip realized in some thermally activated delayed fluorescence emitters is considered to be due to a higher-order triplet excited state (T_n). The aim of this project was to collect experimental evidences of T_n , in order to gain a deeper understanding of its role in the fast spin-flip process. As the main experimental techniques, transient photoluminescence (PL) and time-resolved PL spectrum measurements were utilized. In this project, we first developed the necessary analytic methods of the experimental results and then found experimental conditions where singlet-triplet and triplet-triplet annihilation processes is negligible. In addition, the influences of long-lived PL components due to charge recombination and dimers (or aggregates) in solid-state samples were clarified. Finally, we demonstrated that the energy level of T_n is determined and its characters were revealed by means of transient PL and time-resolved PL spectrum measurements.

研究分野：有機エレクトロニクス

キーワード：熱活性化遅延蛍光材料 高次三重項励起状態 スピン反転 逆項間交差 有機EL

1. 研究開始当初の背景

熱活性化遅延蛍光 (TADF) 材料は一重項励起状態と三重項励起状態のエネルギーギャップ (以下、ST ギャップ) が狭くなるように分子設計されており、キャリア再結合によって一定の割合で生じる三重項励起状態を室温の熱エネルギーだけで一重項励起状態へ逆項間交差させ、最終的に遅延蛍光に変換できる発光材料である。このような発光原理のため、高効率有機 EL 素子を高価な希少元素を使用せずに実現できるとして、また燐光発光材料に比べて材料設計の自由度が高いことから TADF 材料は高い注目を集め、現在に至るまで世界中で精力的に研究開発が進められている。研究開始当初までに ST ギャップを狭くする設計指針は確立されており、数多くの TADF 分子が開発されていたが、他方で、TADF 効率を支配する逆項間交差速度が ST ギャップの大きさだけで決まらないことも明らかになっていた。つまり、スピン反転を引き起こすメカニズムが別に存在し、そのメカニズムと ST ギャップの二つによって逆項間交差速度が決まるということである。研究開始当初までに、スピン反転メカニズムに関する研究も進められており、そのドライビングフォースとして Hyperfine coupling と spin-orbit coupling がその最有力候補として考えられていた。その二つのメカニズムには様々な違いが存在するものの、最低次の一重項励起状態 (S_1) と三重項励起状態 (T_1) に加えて高次三重項励起状態 (T_n) の関与を必要とする点は共通している。しかし T_n に関する実験的証拠は皆無に等しく、スピン反転メカニズムをさらに深く調べることは困難な状況であった。 T_n に関する実験的な調査が難しい理由は後述するが、それでも過渡発光測定の結果を詳細に解析すると二段階の熱活性化プロセスが見られ、中間的な励起状態の存在が示唆されること、あるいは精密な過渡吸収測定を行うと中間的な励起状態と予想される吸収帯が観測されることを我々は見出しており、これらの調査および分析を進めて行けば、 T_n に関する実験的な証拠を収集できると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、一部の高性能 TADF 材料で見られる高速なスピン反転メカニズムを解明することを念頭に、 T_n に関する実験的証拠を収集することを目的とした。また過渡発光測定や時間分解発光スペクトル測定で障害となり得る諸問題の解決にも取り組んだ。さらにホスト材料が TADF 材料の緩和過程に及ぼす影響についても調査した。

3. 研究の方法

本研究では TADF 分子の溶液サンプルおよび薄膜サンプルを対象とし、比較的広い温度範囲内で各種分光測定を行い、また詳細な解析を行った。そのために、サンプル調整法の見直し、クライオスタットや iCCD カメラの導入、測定系の整備、解析方法の見直し等についても取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 緩和定数の決定法の再検討

TADF 材料の過渡発光を解析することで逆項間交差速度を含む各種緩和定数が決定される。その解析には一般的に三準位モデルから導かれる連立微分方程式の解が用いられるが、多くの未知変数を含むために何らかの仮定が必要となる。最も良く用いられるのは S_1 または T_1 からの非輻射緩和速度をゼロと置くものである。しかし本研究のように広い温度範囲で評価を行う場合、あるいは比較のため TADF 効率の低い材料に適用する場合、この仮定に依らない解析方法が不可欠であった。そこで本研究では式の導出について一から見直し、解析方法を再構築するとともに、その適用範囲の判定法や適用範囲外での代替的な評価法の提案を行った。図 1 に示すのは、4CzIPN および 2CzPN の薄膜サンプルで 10 K から 300 K の温度範囲で項間交差速度を見積もった例である。4CzIPN と 2CzPN の薄膜サンプルでは項間交差も熱活性化プロセスであり、その活性化エネルギーはそれぞれ 35 ± 5 meV と 100 ± 10 meV と見積もられた。

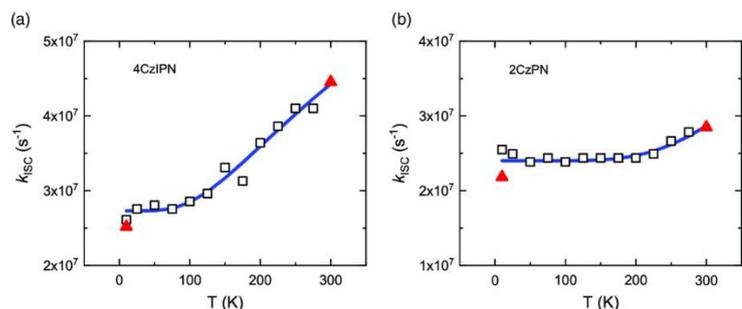


図 1 (a) 4CzIPN と (b) 2CzPN のドーブ薄膜における項間交差速度の温度依存性。図中の三角形は過渡発光と発光量子収率から直接算出した項間交差速度。中間的な温度域では直接算出できないため、代替手段により算出した (四角形)。図中の青線は熱活性化プロセスを仮定したフィッティング結果。

(2) 三重項・三重項対消滅レートの評価法の構築

TADF 材料は励起状態の寿命が比較的長く、また一重項励起状態と三重項励起状態が共存するため、一重項・三重項対消滅（以後、STA）および三重項・三重項対消滅（以後、TTA）が起こりやすい。どちらも過渡発光測定や時間分解発光スペクトル測定に悪影響を及ぼし得るため、STA も TTA も起こらない実験条件を明確にしておく必要がある。その第一歩として STA と TTA を特徴づける対消滅レート (γ_{ST} および γ_{TT}) の決定を試みた。ただし、 γ_{ST} および γ_{TT} を同時に決定する必要性がこれまであまりなかったため、両者を同時決定する方法は確立していなかった。そこで本研究では TADF 材料で観測される TTA による定常発光スペクトルのシフトに着目し、これまでにない全く新しい対消滅レートの決定法を構築し、各種 TADF 材料に適用した。

(3) 薄膜試料における電荷分離とダイマーの形成

有機半導体は励起子束縛エネルギーが大きいので、通常は光励起だけでは電荷は生成しない。しかし、一部の TADF 材料では自発的配向分極により薄膜内部に比較的大きな電界が発生し、電荷分離が起こる。さらにその再結合によって、power-law 減衰する特徴的な長寿命発光が現れる。本研究でも調査した結果、複数の TADF 材料で、広い温度範囲にわたって電荷再結合による長寿命発光が観測されることを見出した。さらに時間分解発光スペクトル測定を行った結果、室温では長寿命発光成分は遅延蛍光と同一のスペクトル形状を有し、極低温 (10 K) では燐光とほぼ同じ発光スペクトルを示すことが分かった。前者は効率的な逆項間交差によるものであり、後者は電荷再結合により 1 : 3 の割合で一重項励起状態と三重項励起状態が生成し、さらに一重項励起状態の一部は三重項励起状態に項間交差したためであると考えられる。この調査で明らかになったことの一つに、宿主材料によ

っては TADF 分子がダイマーもしくは aggregate (以下、単にダイマーと略す) を形成し、燐光よりもレッドシフトした発光を示す点である (図 2)。ダイマーからの瞬時蛍光は数桁速い時間領域に観測されていることから、ミリ秒領域で観測された発光はダイマーからの燐光と判断できる。いずれにせよ、TADF 材料の薄膜サンプルでは非常に多くの発光成分が含まれるため、過渡発光などの解析には細心の注意が必要である。

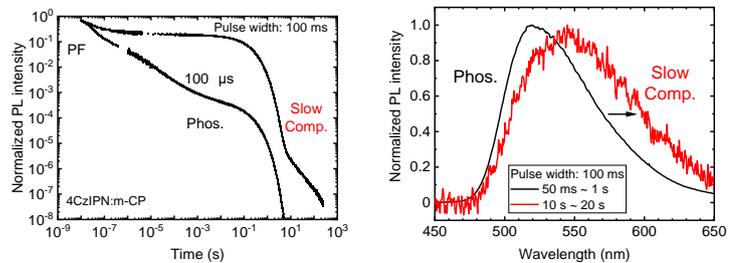


図 2 (左) 10 K における 4CzIPN 薄膜の発光減衰曲線。光照射時間を 100 ms まで延ばすと電荷再結合による長寿命発光成分 (Slow Comp.) が観測できる。(右) 同条件における時間分解発光スペクトル。

(4) 時間分解発光スペクトルに見られる複雑なスペクトルシフトの解明

TADF 材料の時間分解発光スペクトルには複雑なスペクトルシフトが現れる。図 3 にその一例を示すが、ピークエネルギーが一度レッドシフトしてから再度ブルーシフトする様子が見られる。この解析に当たっては、上述の知見に加え、薄膜サンプルで見られる「分散の効果」にも十分配慮した。ここで言う分散の効果とは、宿主材料中に閉じ込められた TADF 分子の状態によって、 S_1 レベルや ST ギャップ、振動子強度などが変化することを指す。2CzPN の室温の測定結果はこの分散の効果だけでほぼ説明することができる。図 3 に示す 10 K のケースでは、励起直後から瞬時蛍光が観測され、 T_n からの燐光が支配的になる時間領域を挟んで最終的に T_1 からの燐光に置き換わる。この時、 T_n からの燐光がブロードなのに対し、 T_1 からの燐光がシャープなため、ピークエネルギーがブルーシフトしたように見えるのである。事実、発光の立ち上がりエネルギーに着目すれば、単調にレッドシフトしていることが分かる。燐光のスペクトル形状の違いは、2CzPN の T_1 は LE 性が強く、 T_n は CT 性が強いことを示唆している。また立ち上がりエネルギーからは T_1 と T_n のエネルギーギャップを見積もることができる。以上のように、過渡発光と時間分解発光スペクトルを詳細に解析すれば T_n のエネルギーレベルやその性質の特定が可能であることが分かった。

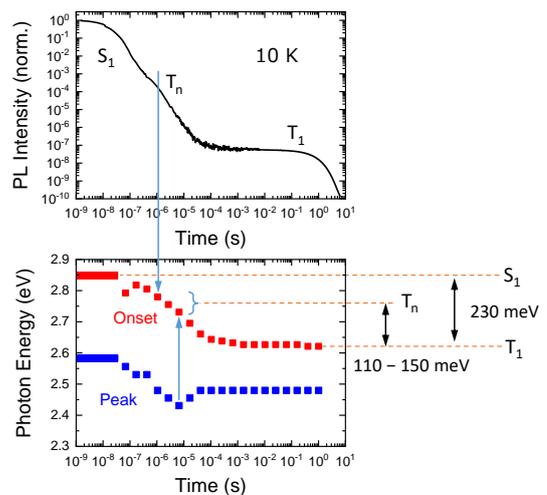


図 3 2CzPN の発光減衰曲線 (上) と時間分解発光スペクトルにおけるピークエネルギーと立ち上がりエネルギーの遅延時間依存性 (下)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7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 Kobayashi Takashi, Kawate Daisuke, Niwa Akitsugu, Nagase Takashi, Goushi Kenichi, Adachi Chihaya, Naito Hiroyoshi | 4. 巻 217 |
| 2. 論文標題 Intersystem Crossing Rate in Thermally Activated Delayed Fluorescence Emitters | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 physica status solidi (a) | 6. 最初と最後の頁 1900616/1~6 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-56945-3 | 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, Chen Xian-Kai, Nakanotani Hajime, Hosokai Takuya, Miyajima Momoka, Notsuka Naoto, Kashima Yuuki, Br?das Jean-Luc, Adachi Chihaya | 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 Nojima Hiroki, Kobayashi Takashi, Nagase Takashi, Naito Hiroyoshi | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Modulated Photocurrent Spectroscopy for Determination of Electron and Hole Mobilities in Working Organic Solar Cells | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 20346/1~8 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1220/1/012018 | 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 Nojima Hiroki, Kobayashi Takashi, Nagase Takashi, Naito Hiroyoshi | 4. 巻 1220 |
| 2. 論文標題 Modulated photocurrent spectroscopies for characterization of the charge transport process in organic photovoltaics | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series | 6. 最初と最後の頁 012018/1~4 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5025870 | 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 Niwa Akitsugu, Haseyama Shota, Kobayashi Takashi, Nagase Takashi, Goushi Kenichi, Adachi Chihaya, Naito Hiroyoshi | 4. 巻 113 |
| 2. 論文標題 Triplet-triplet annihilation in a thermally activated delayed fluorescence emitter lightly doped in a host | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 083301 ~ 083301 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.synthmet.2019.04.005 | 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 Hosokai T., Nakanotani H., Santou S., Noda H., Nakayama Y., Adachi C. | 4. 巻 252 |
| 2. 論文標題 TADF activation by solvent freezing: The role of nonradiative triplet decay and spin-orbit coupling in carbazole benzonitrile derivatives | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Synthetic Metals | 6. 最初と最後の頁 62 ~ 68 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.synthmet.2019.04.005 | 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 細貝拓也 | 4. 巻 87 |
| 2. 論文標題 高効率熱活性化遅延蛍光分子の励起状態ダイナミクス | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 応用物理 | 6. 最初と最後の頁 272-276 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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52件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 10件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 H. Kawasaki, T. Kobayashi, T. Nagase, K. Goushi, C. Adachi, H. Naito |
| 2. 発表標題 Excited state dynamics in a thermally activated delayed fluorescence emitter using time-resolved photoluminescence spectroscopy |
| 3. 学会等名 The 13th Asian Conference on Organic Electronics (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 河崎広空, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 4CzIPNドープ薄膜における光生成電荷の再結合過程 |
| 3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 杉田 椋哉, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 変調分光による有機薄膜太陽電池の光劣化過程の観察 |
| 3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 植野 直, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 非フラーレン材料を用いた近赤外有機光検出器 |
| 3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 杉田 椋哉, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 D/A混合比の異なるPTB7:PC71BM有機薄膜太陽電池における二分子再結合定数とLangevin再結合定数 |
| 3. 学会等名 第18回薄膜材料デバイス研究集会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 河崎広空, 宮本直哉, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 TADF材料のスピンコート薄膜における発光緩和過程: 光電荷生成と再結合緩和 |
| 3. 学会等名 第32回光物性研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 明里直輝, 植野 直, 杉田棕哉, 奥野友基, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 異なるドナーとアクセプターの混合比を持つPTB7-th: ITIC逆構造有機薄膜太陽電池の移動度評価 |
| 3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 河崎広空, 宮本直弥, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 4CzIPNドープ薄膜における光生成電荷の再結合緩和 |
| 3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 杉田棕哉, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 PBDB-T: ITIC有機薄膜太陽電池の作製プロセスと移動度バランス |
| 3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 古郡美紀、中山泰生、永宗靖、細貝拓也 |
| 2. 発表標題 広帯域な時間分解分光高速計測システムの構築とTADF材料への応用 |
| 3. 学会等名 有機EL討論会第32回例会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 古郡美紀、永宗 靖、中山泰生、細貝 拓也 |
| 2. 発表標題 時間分解発光スペクトルの高速計測装置の開発(2) |
| 3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 古郡美紀、永宗 靖、中山泰生、中野谷一、細貝拓也 |
| 2. 発表標題 迅速過渡発光分光装置を用いた超微弱な熱活性化遅延蛍光の観測 |
| 3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 M. Furukori, Y. Nagamune, Y. Nakayama, T. Hosokai |
| 2. 発表標題 Development of High-Throughput Subnanosecond Time-Resolved Photoluminescence Spectrometer |
| 3. 学会等名 The 13th Asian Conference on Organic Electronics (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 河崎広空, 萱苗淳美, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 TADF材料における励起状態ダイナミクスの考察 |
| 3. 学会等名 第68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 植野 直, 森 聖仁, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 開放起電力減衰から求めた有機薄膜太陽電池の二分子再結合定数 |
| 3. 学会等名 第68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 杉田椋哉, 森 聖仁, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 D/A混合比の異なるPTB7:PC71BM有機薄膜太陽電池における二分子再結合係数 |
| 3. 学会等名 第68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 T. Kobayashi |
| 2. 発表標題 Time-resolved photoluminescence study on thermally activated delayed fluorescence emitters based on carbazoyl dicyanobenzene |
| 3. 学会等名 Core to Core Meeting Online Seminar Series 2020-2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 植野 直, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 変調光電流分光法によるPTB7-th:ITIC逆構造有機薄膜太陽電池の電子物性評価 |
| 3. 学会等名 大阪府立大学 研究推進機構21世紀科学研究センター 分子エレクトロニックデバイス研究所 第22回研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 萱苗淳美, 石井智也, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 時間分解発光スペクトル測定を用いたTADF材料の発光緩和過程の解明 |
| 3. 学会等名 第31回光物性研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 河崎広空, 萱苗淳美, 石井智也, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 カルバゾールジシアノベンゼン系TADF材料における発光緩和過程 |
| 3. 学会等名 第17回薄膜材料デバイス研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 森 聖仁, 野島大希, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 変調分光法により決定した有機薄膜太陽電池の二分子再結合定数とLangevin再結合定数 |
| 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 森 聖仁, 中塚英美, 富士本直起, 永瀬 隆, 小林隆史, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 開放起電力減衰、変調開放起電力から求めた二分子再結合定数 |
| 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 植野 直, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 変調光電流分光法によるPTB7-th:ITIC逆構造有機薄膜太陽電池の移動度および局在準位分布評価 |
| 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 萱苗淳美, 石井智也, 小林隆史, 永瀬 隆, 中野谷一, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 熱活性化遅延蛍光材料の項間交差速度の温度依存性 |
| 3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 河崎広空, 萱苗淳美, 石井智也, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 カルバゾールジシアノベンゼン系TADF材料の時間分解発光測定 |
| 3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 久茂田耀, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 疑似太陽光照射下における変調光電流法による有機薄膜太陽電池の電子・正孔移動度同時評価 |
| 3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 森 聖仁, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 変調光起電力法により決定した定常光照射下における有機薄膜太陽電池の二分子再結合定数 |
| 3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 植野 直, 久茂田耀, 森 聖仁, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 変調光電流法による PTB7-th:ITIC 逆構造有機薄膜太陽電池のキャリア移動度評価 |
| 3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 森 聖仁, 久茂田耀, 野島大希, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 変調光電流法を用いた順構造・逆構造P3HT: PCBM有機薄膜太陽電池の電荷輸送特性評価 |
| 3. 学会等名 第30回光物性研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 萱苗淳美, 石井智也, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 スカイブルー発光を示すTADF材料の時間分解発光スペクトル |
| 3. 学会等名 大阪府立大学21世紀科学研究センター 分子エレクトロニックデバイス研究所 第21回研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 森 聖仁, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 変調光電流・変調光起電力法を用いた有機薄膜太陽電池の電荷輸送 |
| 3. 学会等名 大阪府立大学21世紀科学研究センター 分子エレクトロニックデバイス研究所 第21回研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 萱苗淳美, 石井智也, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 スカイブルー発光を示す2CzPNの時間分解発光スペクトル |
| 3. 学会等名 有機EL討論会 第29回例会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石井智也, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 熱活性化遅延蛍光材料における三重項 三重項対消滅評価 |
| 3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 久茂田耀, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 変調光電流法による有機薄膜太陽電池の電子・正孔移動度同時評価における二分子再結合の影響:デバイスシミュレーション |
| 3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 森 聖仁, 小林隆史, 永瀬 隆, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 光誘導吸収法及び変調光起電力法による有機薄膜太陽電池の二分子再結合定数評価 |
| 3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Ishii, A. Niwa, D. Kawate, T. Kobayashi, T. Nagase, K. Goushi, C. Adachi, H. Naito |
| 2. 発表標題 Triexponential photoluminescence decay due to a higher triplet excited state in a TADF emitter |
| 3. 学会等名 The 19th International Workshop on Inorganic and Organic Electroluminescence & 2018 International Conference on the Science and Technology of Emissive Displays and Lighting (EL2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 H. Naito, T. Kobayashi, K. Goushi, C. Adachi |
| 2. 発表標題 Photoluminescence spectroscopy study of excited-state structures of thermally activated delayed-fluorescence emitters |
| 3. 学会等名 The 8th International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (IC00PMA2018) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 D. Kawate, A. Niwa, T. Ishii, T. Kobayashi, T. Nagase, K. Goushi, C. Adachi, H. Naito |
| 2. 発表標題 Evidence of contribution of a higher triplet excited state to photoluminescence dynamics in TADF emitters |
| 3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 T. Ishii, A. Niwa, D. Kawate, T. Kobayashi, T. Nagase, K. Goushi, C. Adachi, H. Naito |
| 2. 発表標題 Relative permittivity dependence of decay rates in thermally activated delayed fluorescence emitter solutions |
| 3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 T. Kobayashi, N. Akitsugu, S. Haseyama, T. Nagase, K. Goushi, C. Adachi, H. Naito |
| 2. 発表標題 Photoluminescence spectral blueshift due to triplet-triplet annihilation in a thermally activated delayed fluorescence emitter |
| 3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石井智也, 川手大輔, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 中野谷一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 臭素置換された熱活性化遅延蛍光材料の光物性評価 |
| 3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 川手大輔, 萱苗淳美, 石井智也, 丹羽顕嗣, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 酸素濃度を変えた4CzIPN溶液試料における発光減衰曲線 |
| 3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石井智也, 丹羽顕嗣, 川手大輔, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 熱活性化遅延蛍光材料における三重項 三重項対消滅速度の評価 |
| 3. 学会等名 大阪府立大学21世紀科学研究センター 分子エレクトロニックデバイス研究所 第20回研究会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石井智也, 丹羽顕嗣, 川手大輔, 小林隆史, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 熱活性化遅延蛍光材料における三重項 三重項対消滅の定量的解析 |
| 3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小林隆史, 丹羽顕嗣, 永瀬 隆, 合志憲一, 安達千波矢, 内藤裕義 |
| 2. 発表標題 熱活性化遅延蛍光材料における三重項・三重項対消滅 スペクトルシフトに基づく考察 |
| 3. 学会等名 有機EL討論会第26回例会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山頭周平、中野谷一、野田大貴、中山泰生、安達千波矢、細貝拓也 |
| 2. 発表標題 室温でTADF不活性な有機分子の光学特性における温度変調効果 |
| 3. 学会等名 有機EL討論会第27回例会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takuya Hosokai |
| 2. 発表標題 Investigation of TADF molecules towards a high speed thermal spin |
| 3. 学会等名 International Workshop "Photofunctional Materials Using Spin Degrees of Freedom: Interplay among synthesis, measurement, and theory" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 細貝拓也 |
| 2. 発表標題 Spin-flip mechanism of highly efficient thermally activated delayed fluorescence molecules |
| 3. 学会等名 ナノ構造・物性 - ナノ機能・応用部会合同シンポジウム (招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 野田大貴、中野谷一、細貝拓也、宮島桃香、飯塚直人、安達千波矢 |
| 2. 発表標題 項間交差過程における中間遷移状態の解明 |
| 3. 学会等名 有機EL討論会第26回例会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山頭周平、縄田尚則、野田大貴、中野谷一、中山泰生、安達千波矢、細貝拓也 |
| 2. 発表標題 TADF材料の発光特性にあたる溶媒・温度の影響 |
| 3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 細貝拓也 |
| 2. 発表標題 高効率TADF分子の分光学的アプローチによる逆系間交差過程の研究 |
| 3. 学会等名 2018年光化学討論会（招待講演） |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takuya Hosokai, Akinori Nawata, Hiroki Noda, Yasuo Nakayama, Hajime Nakanotani, Chihaya Adachi |
| 2. 発表標題 Investigations of solvent and temperature dependence of carbazole benzonitrile derivatives |
| 3. 学会等名 3rd International TADF Workshop（国際学会） |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計2件

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 T. Kobayashi, T. Nagase, H. Naito | 4. 発行年 2021年 |
| 2. 出版社 John Wiley & Sons | 5. 総ページ数 44 |
| 3. 書名 Organic semiconductors for optoelectronics, edited by H. Naito | |

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 T. Kobayashi and H. Naito | 4. 発行年 2020年 |
| 2. 出版社 John Wiley & Sons | 5. 総ページ数 28 |
| 3. 書名 Optical Properties of Materials and Their Applications (2nd edition), edited by J. Singh | |

〔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 | 細貝 拓也 (Hosokai Takuya) (90613513) | 国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員 (82626) | |

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