

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：17102  
研究種目：基盤研究(B) (一般)  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20H02713  
研究課題名(和文) 新規な励起三重項生成法に基づく究極的なフォトン・アップコンバージョン材料の創出  
  
研究課題名(英文) Creation of ultimate photon upconversion materials based on a novel triplet generation method  
  
研究代表者  
楊井 伸浩 (Yanai, Nobuhiro)  
  
九州大学・工学研究院・准教授  
  
研究者番号：90649740  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：低エネルギー光を高エネルギー光に変換するフォトン・アップコンバージョン(UC)を太陽光程度の低い励起光強度で高効率化することは困難であった。また、可視光から紫外光へのUCは光触媒や有用化合物の製造などに重要であるが、効率が低かった。本研究では増感剤と発光体が相分離する問題を電荷移動(CT)錯体の生成により解決し、固体中で緑色光から青色光、青色光から紫外光という二種類のUCを達成し、一般性の高い手法として確立することに成功した。更に新規色素の開発により可視光から紫外光へのUCとして最も高い効率を達成し、太陽光程度の弱い励起光の利用を可能にした。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

固体中でのフォトン・アップコンバージョン(UC)は太陽電池や光触媒などのデバイスへの応用において重要であり、本研究で開発した新しい励起三重項生成法は固体中において様々な波長を高効率に変換する一般的な手法となりうる。また、本研究において可視光から紫外光へのUCの効率を過去の報告より大幅に増大させ、太陽光や室内光程度の弱い励起光を利用可能にしたことは、人工光合成や有用化合物の製造、殺菌や水中の有害物質の分解といった多様な応用に繋がる重要な基礎的知見が得られたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：It has been difficult to achieve high efficiency in photon upconversion (UC), which converts lower-energy light to higher-energy light, at excitation light intensities as low as sunlight. UC from visible light to ultraviolet light is also important for photocatalysis and production of useful compounds, but its efficiency was low. In this study, the problem of phase separation between sensitizer and emitter was solved by forming charge-transfer (CT) complexes, and two types of UC, green light to blue light and blue light to UV light, were successfully achieved in solids and established as a highly general method. Furthermore, by developing new chromophores, the highest UC efficiency from visible light to UV light was achieved, enabling the use of excitation light as weak as sunlight.

研究分野：光機能性材料

キーワード：フォトン・アップコンバージョン 光物性 励起三重項

## 1. 研究開始当初の背景

フォトン・アップコンバージョン (UC) とは、低エネルギーの光を高エネルギーの光に変換する技術であり、太陽光利用などの再生可能エネルギー創出の効率を向上することに寄与する。また、オプトジェネティクスや光線力学療法といった光生物学への応用も期待されている。UC 機構の中でも三重項-三重項消滅に基づくアップコンバージョン (TTA-UC) は比較的低い励起光強度でも機能しうるため注目されている。しかしながら、太陽光程度の低い励起光強度で高効率なフォトン・アップコンバージョンを達成することは未だ困難であった。

また近年、クリーンなエネルギー源である太陽光を光源として、燃料電池の燃料となる水素を製造する人工光合成や、有害物質の分解や抗菌などを行う光触媒に関する研究が多く行われており、その効率の向上が求められている。特に紫外光 (波長 400 nm 以下) の照射により高効率な光触媒反応が達成できるが、地表に届く太陽光のうち紫外光の割合は限られ、大部分は波長 400 nm 以上の可視光や赤外光である。また、紫外光により駆動される光触媒反応は屋内での消臭・抗菌にも有用であるが、屋内で近年多く用いられる LED には紫外光が含まれておらず、紫外光を発する LED などを用いることは余分なエネルギーを消費するため望ましいとは言えない。太陽光や室内 LED に多く含まれる可視光を紫外光へと効率よくアップコンバージョンすることが出来れば、余分なエネルギーを消費することなく、有用な紫外光を発生させることが可能になる。しかし、従来の可視光から紫外光への TTA-UC は変換効率が最大で 10.2% と低く、また太陽光 (数  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) よりも 1000 倍ほど強い強度の励起光 ( $> \text{W}/\text{cm}^2$ ) が必要であるといった問題点を抱えていた。また従来の可視光から紫外光への TTA-UC 系では、多くの場合にドナー分子にイリジウムやカドミウムといった重金属が含まれており、コストと持続可能性の観点から問題を抱えていた。

可視光から紫外光への TTA-UC の中でもより高いエネルギーを有する波長 315 nm 以下の UVB 光に変換することは、光エネルギーを用いた有用化合物の製造や、殺菌、排水中の有害物質の分解に有用である。UVB 光は太陽光にはほとんど含まれず、人工的に生成するには水銀灯などの効率の悪い光源を使用するのが一般的であるため、太陽光や効率の良い LED 光に含まれる可視光を UVB 光へと変換することは応用上重要と考えられる。しかし従来の TTA-UC では、高エネルギーな UVB 光を生成することは困難であった。

## 2. 研究の目的

本研究では太陽光のような低い励起光強度で効率の良いアップコンバージョンを実現することを目指した。太陽電池や光触媒などのデバイスへの応用を見据え、分子結晶中でエネルギーを拡散させるエネルギーマイグレーション機構に基づく TTA-UC システムの構築を目指した。分子結晶中では、分子間距離が 1 nm 以内となるように分子が密にパッキングするため高速なトリプレットエネルギー拡散による低励起光強度での TTA-UC が期待される。しかし TTA-UC の三重項増感分子 (ドナー分子) と発光分子 (アクセプター分子) はサイズや形状が大きく異なるため、一般的に発光分子結晶中に増感分子をドーピングする際に相分離が生じてしまい、TTA-UC 性能が低下してしまう。そこで本研究では、電荷移動 (CT) 錯体の利用を着想した。CT 錯体は電子供与分子 (電子ドナー) と電子吸引分子 (電子アクセプター) から構成され、電子ドナーの最高被占軌道 (HOMO) が電子アクセプターの最低空軌道 (LUMO) より低いエネルギーであるときそれらの相互作用から電荷移動状態ができ、結合状態と反結合状態が形成される。励起一重項  $S_1$  と励起三重項  $T_1$  のエネルギー差 ( $\Delta E_{ST}$ ) は HOMO と LUMO の重なりが少ないほど小さくなるため、CT 錯体は励起一重項  $S_1$  から励起三重項  $T_1$  への項間交差におけるエネルギー損失が少ない優れた三重項増感剤となることが期待される。分子サイズが近い電子ドナーと電子アクセプターを用いることで、相分離を引き起こさずに電子ドナー (TTA-UC 発光体) 結晶中に電子アクセプターを少量ドーピングし、CT 錯体を形成することが可能になると期待される。

可視光から紫外光への TTA-UC に関しては、太陽光程度の励起光強度 (数  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) において効率よく TTA-UC を起こすことが可能な色素材料の開発を目指した。従来太陽光よりも強い強度の励起光 ( $> \text{W}/\text{cm}^2$ ) が必要であった原因としては、紫外発光色素 (アクセプター分子) の TTA 効率が悪いこと、三重項増感剤 (ドナー分子) が生成された紫外発光を吸収してしまうことが挙げられる。そこで本研究では、TTA により一重項励起状態を生成する効率が高く、低い三重項エネルギーを持ちドナーから効率よくエネルギーを受け取ることが出来る新規なアクセプター分子を開発し、また紫外域のアップコンバージョン発光の消光を抑制したドナー分子と組み合わせることで高い TTA-UC 効率を得ることを試みた。更にドナー分子を重金属を含まないものに置き換えることで、重金属フリーかつ高効率な可視光から紫外光への TTA-UC の実現を目指した。また、UVB 光を発することができ、TTA-UC に必要な励起三重項状態を青色光の照射により増感できるアクセプター分子を新たに開発することで、青色 LED 光を高エネルギー紫外光である UVB 光へとアップコンバージョンすることにも挑戦した。

### 3. 研究の方法

固体状態において TTA-UC を示すサンプルの調製は、CT 錯体と発光分子の相分離を防ぐために速度論的に優勢である再沈殿法を用いた。緑色光から青色光への TTA-UC にはアントラセン誘導体を発光体（電子ドナー）に、アントラキノン誘導体を電子アクセプターとして用いた。可視光から紫外光への TTA-UC にはナフタレン誘導体を発光体（電子ドナー）に、無水フタル酸誘導体を電子アクセプターとして用いた。電子ドナーとアクセプターを含む THF 溶液を水中へと注入した後に攪拌し、ろ過により固体サンプルを得た。得られた固体サンプルの紫外可視吸収スペクトルにより、電子ドナーとアクセプターの吸収ピークよりも長波長側にブロードな吸収ピークが観測され、電子アクセプターが電子ドナーの結晶中にドーブされて CT 錯体を形成していることが示唆された。粉末 X 線回折測定より、電子アクセプターが 10 mol%以下の濃度では電子ドナーの結晶に相分離することなくドーブされていることを確認した。得られた固体サンプルを用いて Ar 雰囲気下において TTA-UC 測定を行った。

可視光から紫外光への TTA-UC においては可視域に高いモル吸光係数を持ち、紫外域の吸収が比較的小さいクマリン錯体  $\text{Ir}(\text{C}6)_2(\text{acac})$  をドナーとして用いた。 $\text{Ir}(\text{C}6)_2(\text{acac})$  よりも低いトリプレットエネルギーを持ち、紫外域に蛍光を示す適切なアクセプターを探索したところ、トリイソプロピルシリルエチニル基をもつナフタレン誘導体 (TIPS-NPh) がその要請を満たす優れた分子であることを見出した。また、重金属フリーな三重項増感剤としては、El-Sayed 則に基づき励起一重項と三重項の間で軌道の対称性を変化させることが有効であるため、 $\pi$  軌道と  $n$  軌道が関与するケトン誘導体を用いた。また、 $\text{Ir}(\text{C}6)_2(\text{acac})$  の可視域の強い吸収と紫外域の弱い吸収が配位子であるクマリン誘導体の性質に依るものであることも考慮に入れることで、カルボニル基を有するクマリン誘導体 CBDAC をドナー分子として用いることとした。可視光から UVB 光へのアップコンバージョンに関しては、より短波長の蛍光を得るために TIPS-NPh のナフタレン環をベンゼン環に置き換えた分子 TIPS-Bz を用いた。ドナーとしては TIPS-Bz の三重項を増感できるほど高い三重項エネルギーを有する熱活性型遅延蛍光 (TADF) を示す 4CzIPN を用いた。一連の TTA-UC 測定はドナーとアクセプターの混合溶液をアルゴン雰囲気下で行った。

### 4. 研究成果

再沈殿法により調製したアントラキノン誘導体 1 mol% をドーブしたアントラセン誘導体の結晶を Ar 雰囲気下においてガラス基板を用いて封入し、緑色光を照射したところ青色の UC 発光が得られ、三重項寿命は数十マイクロ秒程度と長寿命であることが確認された。UC 発光強度を励起光強度に対して両対数プロットをとったところ、TTA-UC メカニズムに特有の傾きが 2 から 1 へと変化する挙動が見られた。以上より CT 錯体を増感剤として用いる新規な三重項増感剤生成法による緑色光から青色光への TTA-UC を達成した。同様に無水フタル酸誘導体をナフタレン誘導体にドーブしたサンプルを再沈殿法により調製し、得られた固体サンプルを Ar 雰囲気下において石英基板で封入し、青色光を照射したところ紫外域に UC 発光が確認された。三重項寿命はミリ秒程度と長寿命であった。UC 発光強度の励起光強度依存性においては両対数プロットにおいて傾きが 2 から 1 へと変化する挙動が確認でき、そのしきい励起光強度は  $1 \text{ W cm}^{-2}$  を下回り、固体材料としては比較的低い値であった。以上より CT 錯体を増感剤として用いるという新規な三重項増感剤生成法による TTA-UC を緑色光から青色光、青色光から紫外光という二種類の変換波長で達成し、一般性の高い手法として確立することに成功した。

溶液中における可視光から紫外光への TTA-UC の発現においては、 $\text{Ir}(\text{C}6)_2(\text{acac})$  と TIPS-NPh の混合溶液に  $445 \text{ nm}$  の青色光を照射したところ、 $372 \text{ nm}$  にピークを持つ UC 発光が確認された。UC 発光強度の励起光強度依存性を調べたところ、 $I_{th}$  は  $1.1 \text{ mW cm}^{-2}$  と太陽光強度程度に匹敵するほど低く、UC 効率従来報告されていた最高値よりも 2 倍ほど高い 20.5% という値を示した。これらは新規に開発したアクセプター分子である TIPS-NPh の TTA により一重項励起状態を生成する効率が高く、励起三重項寿命が長いことに由来していることが明らかとなった。実際にソーラーシミュレーター（疑似太陽光）と室内 LED をそれぞれドナーとアクセプターの混合溶液に照射したところ、アップコンバージョンされた紫外発光を発生

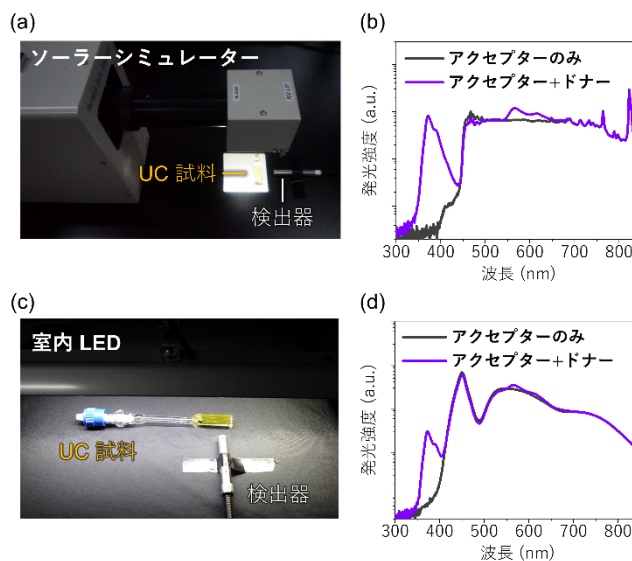


図 1. ソーラーシミュレーターによる光照射時の (a) 測定の様子と (b) UC 発光スペクトル、室内 LED 光の照射時の (c) 測定の様子と (d) UC 発光スペクトル

することに成功した (図 1)。さらに、室内 LED と混合溶液の距離を離していく実験を行うと、50 cm 離れた場所の LED 光によっても紫外発光が生じていることが確認された (図 2)。

重金属フリーなドナー分子である CBDAC とアクセプター分子 TIPS-NPh のトルエン溶液は青色光の励起により紫外域に UC 発光を示した (図 3)。この系において重金属フリーな可視光から紫外光への TTA-UC 系として 20% を超える高い UC 効率 (20.3%) を初めて達成した。また、従来の重金属フリーな可視光から紫外光への TTA-UC 系では強いしきい励起光強度 (>W/cm<sup>2</sup>) が必要であったの

に対し、本系ではしきい励起光強度を数十 mW/cm<sup>2</sup> まで大幅に下げることにも成功した。これはカルボニル基を修飾したクマリン誘導体 CBDAC が高い吸光係数を示すことに加え、十分なスピン軌道相互作用により効率よく項間交差を起こすためと考えられる。

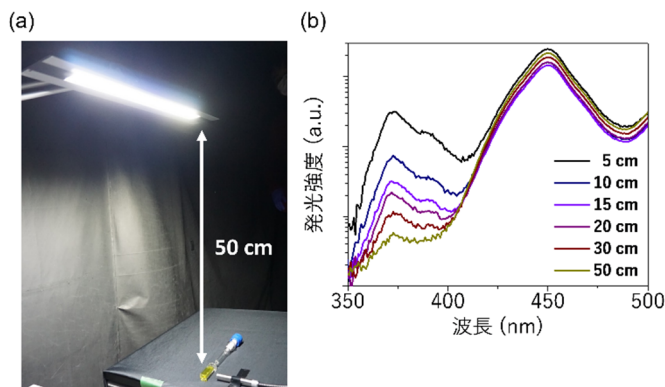


図 2. (a) 室内 LED と UC 試料を 50 cm 離れた状態の写真、(b) 室内 LED と UC 試料の距離を変化させたときの UC 発光スペクトル

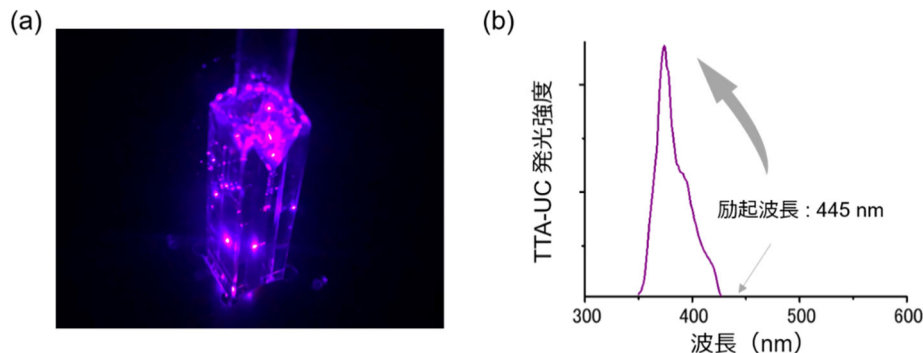


図 3. CBDAC と TIPS-NPh のトルエン溶液に青色レーザー光を照射時の (a) サンプルが発光する様子と (b) 発光スペクトル

可視光から UVB 光へのアップコンバージョン系に関しては、77 K での燐光スペクトル測定により TIPS-Bz の三重項エネルギーを見積もったところ 2.64 eV であり、4CzIPN の三重項エネルギー 2.72 eV よりも低いことが示唆された。そこで実際に 4CzIPN と TIPS-Bz の混合溶液を青色光で励起したところ、4CzIPN から TIPS-Bz への三重項エネルギー移動が起き、その後 TIPS-Bz が TTA を起こすことで波長 315 nm 以下の UVB 領域に UC 発光を示した (図 4)。これは TTA-UC メカニズムにより UVB 領域に明確なアップコンバージョン発光を得た初めての例である。更に市販の青色 LED を光源として使用し、発生した紫外光を利用して、通常であれば非常に厳しい反応条件を必要とする強い化学結合の切断を行うことにも成功した。今回実現に成功した青色光から UVB 光へのアップコンバージョンの効率を更に高め、また色素材料の安定性を高めることで、繰り返し利用することが可能な UVB 発生光源の実現が期待される。このような光源は殺菌や水中の有害物質の分解、有用化合物の製造において重要な役割を果たすと期待される。

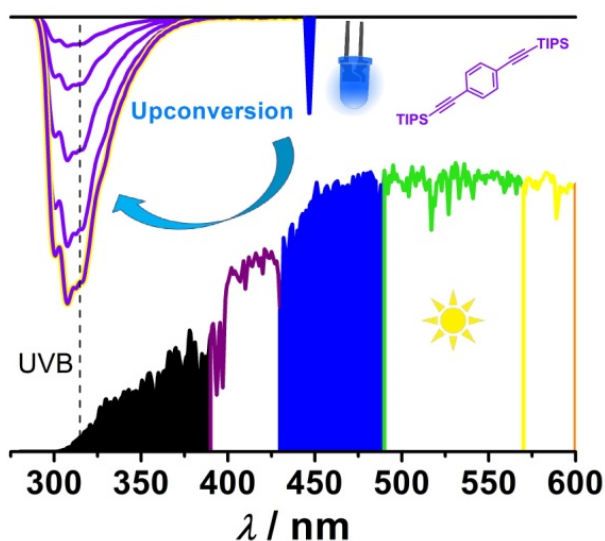


図 4. 青色 LED 光から UVB 光へのアップコンバージョンと、対応する波長域の太陽光スペクトル

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kawashima Yusuke, Hamachi Tomoyuki, Yamauchi Akio, Nishimura Koki, Nakashima Yuma, Fujiwara Saiya, Kimizuka Nobuo, Ryu Tomohiro, Tamura Tetsu, Saigo Masaki, Onda Ken, Sato Shunsuke, Kobori Yasuhiro, Tateishi Kenichiro, Uesaka Tomohiro, Watanabe Go, Miyata Kiyoshi, Yanai Nobuhiro	4. 巻 14
2. 論文標題 Singlet fission as a polarized spin generator for dynamic nuclear polarization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-36698-4	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 Matsumoto Naoto, Nishimura Koki, Kimizuka Nobuo, Nishiyama Yusuke, Tateishi Kenichiro, Uesaka Tomohiro, Yanai Nobuhiro	4. 巻 144
2. 論文標題 Proton Hyperpolarization Relay from Nanocrystals to Liquid Water	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 18023 ~ 18029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.2c07518	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 Bharmoria Pankaj, Edhborg Fredrik, Bildirir Hakan, Sasaki Yoichi, Ghasemi Shima, Martensson Anders, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo, Albinsson Bo, Borjesson Karl, Moth-Poulsen Kasper	4. 巻 10
2. 論文標題 Recyclable optical bioplastics platform for solid state red light harvesting via triplet-triplet annihilation photon upconversion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry A	6. 最初と最後の頁 21279 ~ 21290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2TA04810H	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 Zahringer Till J. B., Moghtader Julian A., Bertrams Maria Sophie, Roy Bibhisan, Uji Masanori, Yanai Nobuhiro, Kerzig Christoph	4. 巻 62
2. 論文標題 Blue to UVB Upconversion, Solvent Sensitization and Challenging Bond Activation Enabled by a Benzene Based Annihilator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 e202215340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202215340	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 Harada Naoyuki, Uji Masanori, Singh Baljeet, Kimizuka Nobuo, Yanai Nobuhiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Porous film impregnation method for record-efficiency visible-to-UV photon upconversion and subsolar light harvesting	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D3TC00236E	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 Nishimura Koki, Yabuki Reiya, Hamachi Tomoyuki, Kimizuka Nobuo, Tateishi Kenichiro, Uesaka Tomohiro, Yanai Nobuhiro	4. 巻 127
2. 論文標題 Dynamic Electron Polarization Lasting More Than 10 $\mu$ s by Hybridizing Porphyrin and TEMPO with Flexible Linkers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 1219 ~ 1228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.2c07936	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 Uji Masanori, Zahringer Till J. B., Kerzig Christoph, Yanai Nobuhiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Visible to UV Photon Upconversion: Recent Progress in New Materials and Applications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202301506	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 Hamachi Tomoyuki, Nishimura Koki, Kouno Hironori, Kawashima Yusuke, Tateishi Kenichiro, Uesaka Tomohiro, Kimizuka Nobuo, Yanai Nobuhiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Porphyrins as Versatile, Aggregation-Tolerant, and Biocompatible Polarizing Agents for Triplet Dynamic Nuclear Polarization of Biomolecules	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 2645 ~ 2650
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.1c00294	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 Sasaki Yoichi, Amemori Shogo, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 94
2. 論文標題 Singlet-to-Triplet Absorption for Near-Infrared-to-Visible Photon Upconversion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1760 ~ 1768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20210114	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 Yamauchi Akio, Fujiwara Saiya, Nishimura Koki, Sasaki Yoichi, Tateishi Kenichiro, Uesaka Tomohiro, Kimizuka Nobuo, Yanai Nobuhiro	4. 巻 125
2. 論文標題 Design Guidelines to Elongate Spin-Lattice Relaxation Times of Porphyrins with Large Triplet Electron Polarization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 4334 ~ 4340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.1c01839	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 Bossanyi David G., Sasaki Yoichi, Wang Shuangqing, Chekulaev Dimitri, Kimizuka Nobuo, Yanai Nobuhiro, Clark Jenny	4. 巻 1
2. 論文標題 Spin Statistics for Triplet-Triplet Annihilation Upconversion: Exchange Coupling, Intermolecular Orientation, and Reverse Intersystem Crossing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JACS Au	6. 最初と最後の頁 2188 ~ 2201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacsau.1c00322	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 Bossanyi David G., Sasaki Yoichi, Wang Shuanqing, Chekulaev Dimitri, Kimizuka Nobuo, Yanai Nobuhiro, Clark Jenny	4. 巻 10
2. 論文標題 In optimized rubrene-based nanoparticle blends for photon upconversion, singlet energy collection outcompetes triplet-pair separation, not singlet fission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 4684 ~ 4696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1TC02955J	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 Koharagi Mio, Harada Naoyuki, Okumura Keisuke, Miyano Junji, Hisamitsu Shota, Kimizuka Nobuo, Yanai Nobuhiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Green-to-UV photon upconversion enabled by new perovskite nanocrystal-transmitter-emitter combination	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 19890 ~ 19893
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1NR06588B	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 Uji Masanori, Harada Naoyuki, Kimizuka Nobuo, Saigo Masaki, Miyata Kiyoshi, Onda Ken, Yanai Nobuhiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Heavy metal-free visible-to-UV photon upconversion with over 20% efficiency sensitized by a ketocoumarin derivative	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 4558 ~ 4562
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1TC05526G	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 Fujiwara Saiya, Matsumoto Naoto, Nishimura Koki, Kimizuka Nobuo, Tateishi Kenichiro, Uesaka Tomohiro, Yanai Nobuhiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Triplet Dynamic Nuclear Polarization of Guest Molecules through Induced Fit in a Flexible Metal-Organic Framework	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 e202115792
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202115792	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 Kashino Tsubasa, Haruki Rena, Uji Masanori, Harada Naoyuki, Hosoyamada Masanori, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Design Guidelines for Rigid Epoxy Resins with High Photon Upconversion Efficiency: Critical Role of Emitter Concentration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscami.1c17021	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 Sasaki Yoichi, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Osmium Complex-Chromophore Conjugates with Both Singlet-to-Triplet Absorption and Long Triplet Lifetime through Tuning of the Heavy-Atom Effect	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.1c03129	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 Haruki Rena, Sasaki Yoichi, Masutani Kouta, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 56
2. 論文標題 Leaping across the visible range: near-infrared-to-violet photon upconversion employing a silyl-substituted anthracene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 7017 ~ 7020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CC02240C	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 Kinoshita Mika, Sasaki Yoichi, Amemori Shogo, Harada Naoyuki, Hu Zhanhao, Liu Zonghao, Ono Luis K., Qi Yabing, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 4
2. 論文標題 Photon Upconverting Solid Films with Improved Efficiency for Endowing Perovskite Solar Cells with Near Infrared Sensitivity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ChemPhotoChem	6. 最初と最後の頁 5271 ~ 5278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cptc.202000143	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 Harada Naoyuki, Sasaki Yoichi, Hosoyamada Masanori, Kimizuka Nobuo, Yanai Nobuhiro	4. 巻 60
2. 論文標題 Discovery of Key TIPS Naphthalene for Efficient Visible to UV Photon Upconversion under Sunlight and Room Light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 142 ~ 147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202012419	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 Bharmoria Pankaj, Hisamitsu Shota, Sasaki Yoichi, Kang Tejwant Singh, Morikawa Masa-aki, Joarder Biplab, Moth-Poulsen Kasper, Bildirir Hakan, Martensson Anders, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 Advance Article
2. 論文標題 Photon upconverting bioplastics with high efficiency and in-air durability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 Advance Article
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1TC00287B	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 Ehrler Bruno, Yanai Nobuhiro, Nienhaus Lea	4. 巻 154
2. 論文標題 Up- and down-conversion in molecules and materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 070401 ~ 070401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0045323	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 Kashino Tsubasa, Hosoyamada Masanori, Haruki Rena, Harada Naoyuki, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 13
2. 論文標題 Bulk Transparent Photon Upconverting Films by Dispersing High-Concentration Ionic Emitters in Epoxy Resins	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 13676 ~ 13683
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaami.0c23121	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31件 (うち招待講演 31件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 太陽光・室内光のアップコンバージョンによる紫外光発生
3. 学会等名 高分子同友会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Upconverting sunlight and room light to UV light
3. 学会等名 6th MSE Symposium in Advanced Materials and Catalysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 励起三重項を用いた光・スピン変換機能
3. 学会等名 第2回生体内超分子システム研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 分子性材料ならではの光機能発現を目指して
3. 学会等名 有機合成化学協会九州山口支部 第34回若手研究者のためのセミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 New chromophores and assemblies showing photon upconversion and singlet fission
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Singlet Fission and Photon Fusion (ISPF2) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 光励起三重項の機能化学
3. 学会等名 分子工学コロキウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Photon upconverting molecular materials
3. 学会等名 産研国際シンポジウム（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 フォトン・アップコンバージョン ～原理・評価法から色素・材料の設計指針、応用と最近の展開まで～
3. 学会等名 株式会社情報機構 オンラインセミナー（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 可視光から紫外光へのフォトン・アップコンバージョン
3. 学会等名 光化学の新展開：合成、計測、機能のインタープレイ！，日本化学会 第103 春季年会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 分子性フォトン・アップコンバージョン材料
3. 学会等名 強光子場科学研究懇談会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 太陽光や室内LEDで駆動する可視光から紫外光へのアップコンバージョン
3. 学会等名 第383回蛍光体同学会講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 分子系フォトン・アップコンバージョンの原理と新展開
3. 学会等名 フォトニクスポリマー研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Upconverting sunlight and indoor light to create UV light
3. 学会等名 MSDE Symposium 2021: Frontiers in Molecular Engineering（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 励起三重項の機能化学
3. 学会等名 大阪市立大学大学院工学研究科セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 Materials Chemistry of Photon Upconversion: Development, Assembly, and Application of Chromophores
3. 学会等名 11th Asian Photochemistry Conference (APC 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 New materials for efficient photon upconversion at low excitation intensity
3. 学会等名 The 4th Workshop of Reaction Infography (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 分子性固体材料におけるトリプレットの活用
3. 学会等名 物性研短期研究会「分子性固体研究の拡がり：新物質と新現象」（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Control of exciton dynamics for efficient photon upconversion in solid materials
3. 学会等名 2021 MRS Fall Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Near-infrared-to-visible photon upconversion based on S-T absorption
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Functional chemistry of triplet state: photon upconversion and hyperpolarization
3. 学会等名 Dept. of Chemistry, University at Albany, SUNY (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 太陽光・室内光を紫外光へアップコンバージョンする
3. 学会等名 有機エレクトロニクス材料研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 光励起三重項のテンプレートロジーに向けて
3. 学会等名 日本化学会第102 春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 トリプレットの機能化学
3. 学会等名 第二回ケムステVシンポジウム「光化学へようこそ！～ 分子と光が織りなす機能性材料の新展開 ～」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Materials chemistry of triplet-DNP
3. 学会等名 Weekly ssNMR/DNP Zoominar, MIT (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 能性材料でエネルギー、バイオ分野に革新を：アップコンバージョンと超核偏極
3. 学会等名 ナイスステップな研究者2019講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 NIR-to-Visible Photon Upconversion for Applications in Energy and Biology
3. 学会等名 apan-Taiwan Young Scientists Polymer Symposium, 第69回高分子討論会 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Photon Upconversion and Triplet Dynamic Nuclear Polarization in MOFs
3. 学会等名 PRiME 2020 Meeting (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 薩長同盟的光機能性材料開発
3. 学会等名 第10回CSJ化学フェスタ2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 トリプレットの機能化学：フォトン・アップコンバージョンと超核偏極
3. 学会等名 第5回有機若手ワークショップ, 京都大学 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Materials chemistry of triplet dynamic nuclear polarization
3. 学会等名 The 3rd International Forum on Quantum Metrology and Sensing (IFQMS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Solving Challenging Problems in Visible-to-UV and NIR-to-Visible Photon Upconversion by Developing New Dyes
3. 学会等名 nanoGe Spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>重金属を用いず可視光を紫外光へと高効率変換する分子性材料を発見  <a href="https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/715">https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/715</a>  可視光から紫外光へのアップコンバージョン効率の世界記録を大幅に更新  <a href="https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/512">https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/512</a>  青色LEDを高エネルギーなUVB光へと変換する色素材料を開発  <a href="https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/850">https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/850</a></p>
--

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			
ドイツ	ヨハネス・グーテンベルク大学 マインツ			
英国	University of Sheffield			
米国	Florida State University	Cornell University	University of California, Santa Barbara	
韓国	Pusan National University			
スウェーデン	Chalmers University of Technology			
オランダ	AMOLF			