

令和 2 年 4 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04799

研究課題名(和文) 光生物学の革新を指向した励起三重項制御基盤の確立

研究課題名(英文) Control of excited triplet formation and stabilization towards biological applications

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) 19,700,000円

研究成果の概要(和文)：生体透過性の高い近赤外光から可視光へのアップコンバージョンは生体内光源としての応用が期待されている。しかし、近赤外光を可視光へと効率良くアップコンバージョンすることは容易ではなく、また水中に溶存する酸素分子による消光が問題となっていた。そこで本研究では、基底状態から三重項状態への直接遷移(S-T吸収)を示す金属錯体を三重項増感剤として用い、また酸素バリア能を有する分子集合体を開発することにより、空気中・水中で近赤外光を可視光へと変換することに成功した。アップコンバージョン発光により神経細胞の形態制御にも成功し、分子系アップコンバージョンを用いた初のオプトジェネティクスを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分子の励起三重項を用いたアップコンバージョンにより空気中・水中において近赤外光を可視光へと変換する材料の開発に成功し、オプトジェネティクスへの応用を初めて実証した。この研究を通じ、励起三重項を自在に発生して安定化する技術を開発し、更には励起三重項のみならず他の空気中で不安定な化学種を用いた機能性材料の開発にも繋がる重要な知見を得た。本研究で見出した方法論を基により高効率なアップコンバージョン材料を開発することで、太陽電池や人工光合成といった太陽光エネルギーの利用技術の高効率化や、光線力学療法やオプトジェネティクスといったバイオ分野への応用に繋がると期待される。

研究成果の概要(英文)：Photon upconversion from near-infrared (NIR) light to visible light has attracted much attention as an internal light source for biological applications. However, it has been difficult to upconvert NIR light to visible light with good efficiency, and the quenching of upconverted emission by dissolved oxygen molecules has been a severe issue. In this project, we employed metal complexes showing singlet-to-triplet direct transition (S-T absorption) as the triplet sensitizer, and developed supramolecular systems with good oxygen-barrier ability. We achieved NIR-to-blue upconversion in air-saturated water and applied this upconversion hydrogels to control the morphology of neurons. This demonstrates the first example of optogenetics by molecular TTA upconversion systems.

研究分野：機能性材料化学

キーワード：フォトン・アップコンバージョン 励起三重項 近赤外光 S-T吸収 分子集合体 ヒドロゲル オプトジェネティクス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

長波長の低エネルギー光を短波長の高エネルギー光へと変換する現象をフォトン・アップコンバージョンという。中でも、分子の三重項 三重項消滅を用いたフォトン・アップコンバージョン (triplet-triplet annihilation-based photon upconversion, TTA-UC) は、低励起光強度で高効率な波長変換を実現しようとして注目されている。近赤外光は生体透過性が高いため、近赤外光から可視光へのアップコンバージョンは優れた生体内光源として光線力学療法やオプトジェネティクスへの応用が期待されている。しかし、近赤外光を可視光へと効率よく変換することは容易ではなく、水中に溶存する酸素による消光が問題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、空気中・水中で近赤外光から可視光へのフォトン・アップコンバージョンを達成することにより、バイオ分野への展開を可能にする励起三重項の制御基盤を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

近赤外光から可視光への TTA-UC が困難である理由は、三重項増感剤 (ドナー) の励起一重項から励起三重項への系間交差の際のエネルギーロスにあった。そこで基底一重項状態から励起三重項状態への直接遷移 (S-T 吸収) を示す金属錯体をドナーとして用いることで、この問題の解決を図った。また、励起三重項は水中の溶存酸素により容易に消光されてしまうため、水中において色素周りに密な分子ネットワークを構築することで酸素バリア能を有する分子集合体を開発し、この問題の解決を試みた。

4. 研究成果

本研究では新しい色素分子及びマトリックス材料を開発することにより、近赤外光から可視光へのフォトン・アップコンバージョンを達成し、また水中・空気中での高効率なフォトン・アップコンバージョンを実現した。更には TTA-UC として初となるオプトジェネティクスへの応用にも成功した。以下に本研究で得られた成果の例を示す。

(1) 生体高分子を用いたフォトン・アップコンバージョンを示すヒドロゲルの開発 (*J. Am. Chem. Soc.* **2018**, *140*, 10848-10855)

生体高分子と界面活性剤の複合材料に色素を高濃度に分散させるという新しいコンセプトにより、水中かつ空気中において高効率なアップコンバージョンを示すヒドロゲルの開発に成功した (図 1)。生体適合性の高いマトリックスとしてゼラチンを採用し、色素の凝集を防ぐために界面活性剤として Triton X-100 (TX-100) を複合化した。ゼラチンと TX-100 の複合ヒドロゲル中にアップコンバージョンを示すペアとしてドナーの PtOEP とアクセプターの DPAS を加えたところ、これらの色素分子が凝集することなく分散されていることが各種分光測定より分かった。得られた複合ヒドロゲルに 532 nm の緑色レーザーを照射したところ、空気中で酸素が飽和している条件にもかかわらず明確なアップコンバージョン発光を観測した。得られたアップコンバージョン発光の量子収率を測定したところ、13.5% という非常に高い値が得られた。これはこれまでの水中におけるフォトン・アップコンバージョンとしては最も高い値の一つであり、生体高分子と界面活性剤の複合体をマトリックスとして用いる方法が空気中で高効率なアップコンバージョンを発現することに極めて有用であることが明らかとなった。

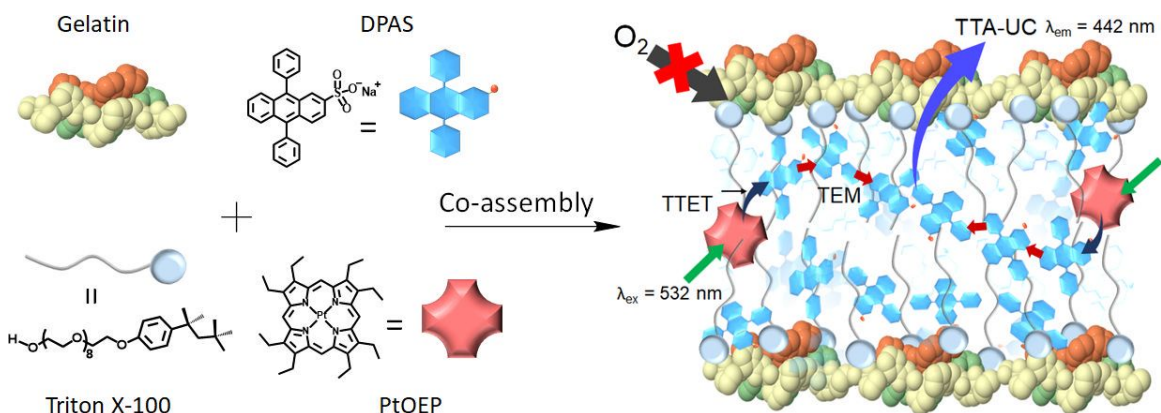


図 1. 生体高分子 (ゼラチン) と界面活性剤の複合体中に色素を高濃度に分散することで、水中・空気中でも高効率なフォトン・アップコンバージョンを示すヒドロゲルの開発に成功

(2) 水中において酸素バリア能を獲得するための材料設計指針の確立 (*Chem.-Eur. J.* **2019**, *25*, 6124-6130)

励起三重項は水中に溶存する酸素分子により容易に消光されてしまうため、光子・アップコンバージョンの生体応用を目指す上では水中においていかに酸素バリア能を有する構造体を構築するかが鍵となる。そこで本研究では、色素周りに疎水性相互作用からなる分子ネットワークを構築し、その疎水性部位の構造と光子・アップコンバージョン性能の関連を系統的に調べることで、色素周りの分子ネットワーク密度が酸素バリア能にとって重要であることを明らかにした(図 2a)。水に分散可能な両親媒性の色素として、9,10-diphenylanthracene (DPA)にアルキル鎖とアンモニウム塩を修飾した分子 A1 を設計、合成した(図 2b)。ドナーである PtOEP を A1 の水中ナノ集合体中へと導入し、緑色のレーザーを照射したところ、空気中ではアップコンバージョン発光が完全に消光され観測されなかった。そこで静電相互作用と疎水性相互作用によりカチオン性の A1 とアニオン性のオレイン酸 (OL) を複合化したところ、明確なアップコンバージョン発光を空気で飽和した水中においても観測することが出来た。オレイン酸の濃度を上げるに従って複合体の酸素バリア能が向上し、脱気条件下と比較して空気中においても約 80% のアップコンバージョン発光が保たれることが分かった。この超分子集合体の高い酸素バリア能により、空気で飽和した水中において最も高い 14.4% というアップコンバージョン量子収率を達成した。

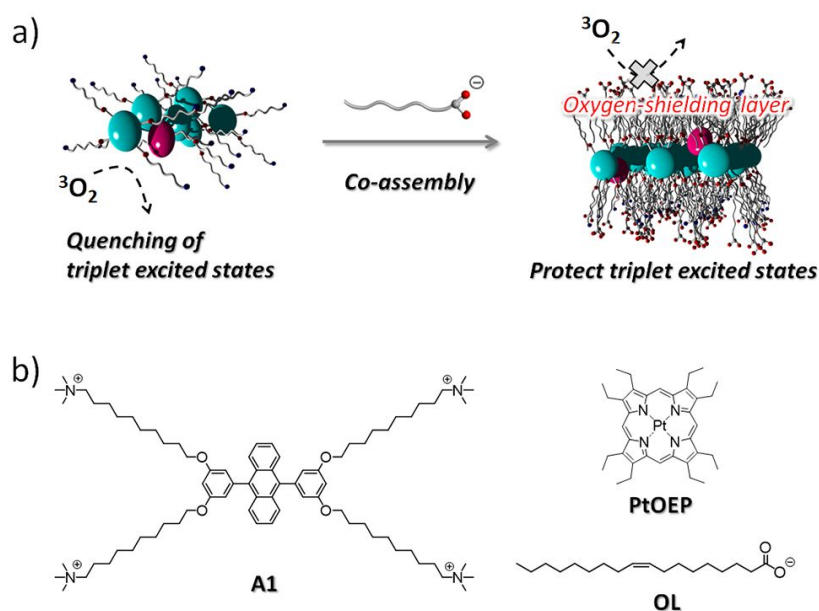


図 2. (a) 本研究のコンセプトである密な疎水性イオン対形成による酸素バリア能の獲得、(b) 本研究で用いた分子の構造

(3) 中性の両親媒性分子からなるアップコンバージョン超分子集合体の構築 (*Chem.-Asian J.* **2019**, *14*, 1723-1728)

これまでの研究ではイオン性の両親媒性分子からなる超分子集合体において、空気中・水中で安定な光子・アップコンバージョンを達成してきたが、より生体適合性の高い系の構築を志向し、中性かつ生体適合性の高いオリゴエチレングリコール鎖を有する両親媒性アクセプター分子を用いたアップコンバージョン系の構築を行った。アクセプターの DPA の片側に疎水性のアルキル鎖、もう片側に親水性のオリゴエチレングリコール鎖を修飾した新規両親媒性分子を合成した(図 3a)。この両親媒性分子は水中で 160 nm 程度のナノ集合体を形成し、その集合体中にドナーである PtOEP を凝集することなく導入可能であることが分かった。得られたドナー・アクセプター複合体は空気が飽和した水中でも緑色光から青色光へのアップコンバージョンを示した(図 3b)。一方、同じドナー・アクセプター分子をクロロホルム中に溶解させたところ、色素が集合せず分子分散状態となり、アップコンバージョン発光は観測されなかった。これらの結果より、水中における密な超分子集合体の形成が酸素バリア能の発現にとって有用であることが示された。また、バイオ応用に向けてはアップコンバージョン材料が低濃度に希釈された条件においても機能することが重要となる。そこで水中におけるアクセプターの濃度が 40 μ M、ドナーの濃度が 0.1 μ M という希釈条件で検討を行ったところ、140 nm 程度のナノ集合体が形成され、空気が飽和した条件においても緑色光から青色光へのアップコンバージョンが観測され、本系が希釈にも耐えうるアップコンバージョン超分子系であることが明らかとなった。

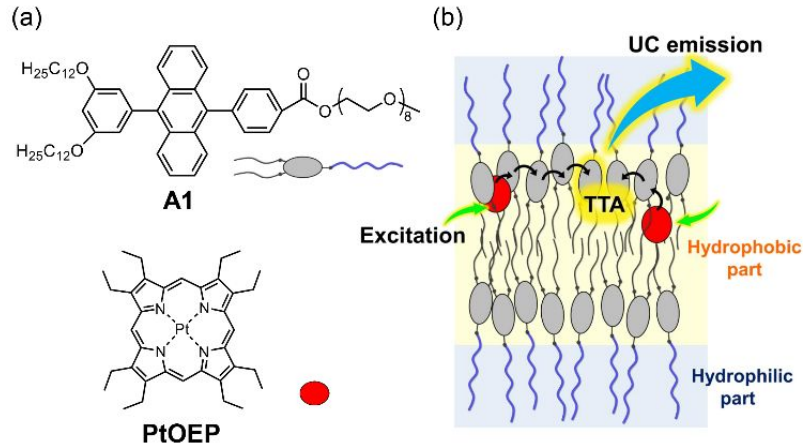


図 3. (a) 本研究で用いた分子の構造、(b) 水中での超分子集合体における光子・アップコンバージョン

(4) 近赤外 可視アップコンバージョンのオプトジェネティクスへの応用 (*Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, 58, 17827-17833.)

近赤外光から可視光への TTA-UC は長らく困難であったが、我々は最近の研究において基底一重項状態から励起三重項状態への直接遷移 (S-T 吸収) を示す金属錯体を三重項増感剤 (ドナー) として用いることで、バイオ分野への応用に必要な近赤外 - 青アップコンバージョンを可能にした。しかし、S-T 吸収を示すドナーの三重項寿命が短いという欠点があった。そこで S-T 吸収を示すドナー分子にアクセプター分子を連結し、より励起寿命の長いアクセプター部位に三重項エネルギーを溜めることにより、従来より 120 倍も長寿命な三重項励起状態を達成した。これにより粘度の高いヒドロゲル中においても三重項エネルギーを発光色素に受け渡し、アップコンバージョンすることが可能となった。また、加熱処理によりゲルを構成するミセルの集合状態を変化させて酸素の侵入を阻害することにより、空気中においてもアップコンバージョン発光を示すヒドロゲルを開発した。青色光に反応して細胞の形を操作できる遺伝子を神経細胞に導入し、その神経細胞を播種したシャーレにアップコンバージョンヒドロゲルを浸漬して波長 724 nm の近赤外光を照射したところ、発生した青色アップコンバージョン発光により神経細胞の形態を制御することに成功した (図 4)。すなわち、本研究で目的とするバイオ応用に向けた基盤的なアップコンバージョン技術の開発に成功した。

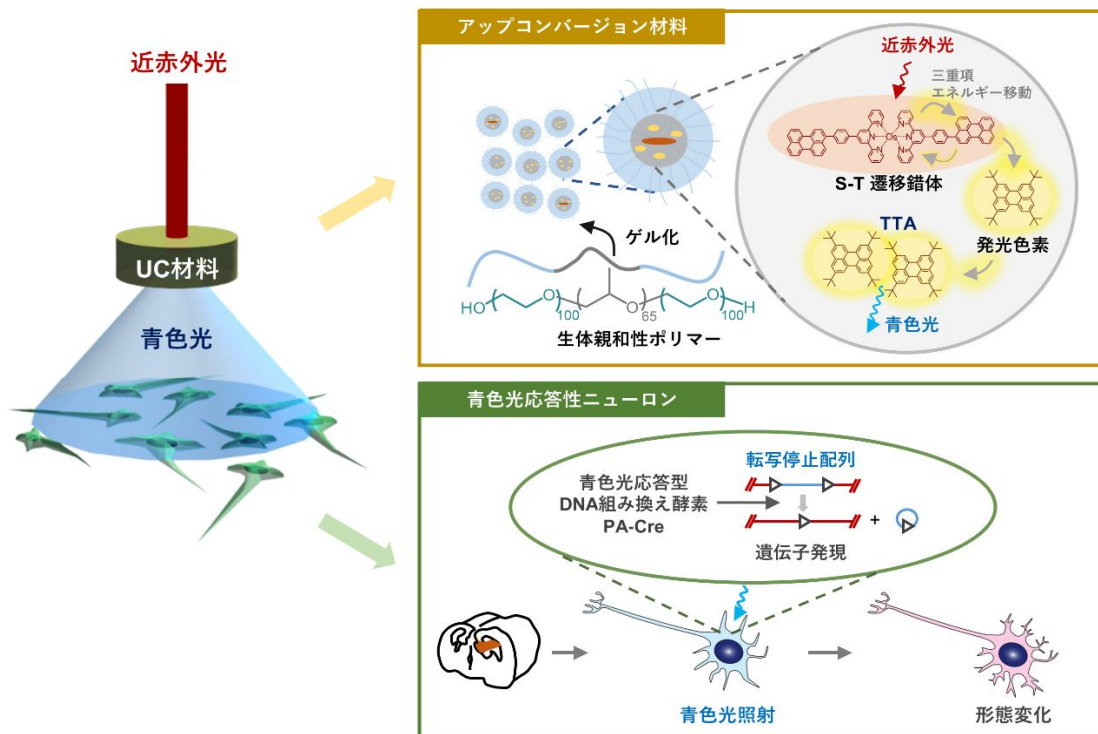


図 4. 近赤外 可視アップコンバージョンを示すヒドロゲルによるニューロンの遺伝子発現制御

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計30件（うち査読付論文 30件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kouno Hironori, Kawashima Yusuke, Tateishi Kenichiro, Uesaka Tomohiro, Kimizuka Nobuo, Yanai Nobuhiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Nonpentacene Polarizing Agents with Improved Air Stability for Triplet Dynamic Nuclear Polarization at Room Temperature	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 2208 ~ 2213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.9b00480	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, Kouno Hironori, Tateishi Kenichiro, Uesaka Tomohiro, Ideta Keiko, Kimizuka Nobuo, Yanai Nobuhiro	4. 巻 21
2. 論文標題 Triplet dynamic nuclear polarization of nanocrystals dispersed in water at room temperature	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 16408 ~ 16412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CP03330K	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 Okumura Keisuke, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 48
2. 論文標題 Visible-to-UV Photon Upconversion Sensitized by Lead Halide Perovskite Nanocrystals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1347 ~ 1350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.190473	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 Lee Hak-Lae, Park Jung Hwan, Choe Hyun-Seok, Lee Myung-Soo, Park Jeong-Min, Harada Naoyuki, Sasaki Yoichi, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo, Zhu Jintao, Bhang Suk Ho, Kim Jae-Hyuk	4. 巻 11
2. 論文標題 Upconverting Oil-Laden Hollow Mesoporous Silica Microcapsules for Anti-Stokes-Based Biophotonic Applications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 26571 ~ 26580
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b06620	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 Sasaki Yoichi, Oshikawa Mio, Bharmoria Pankaj, Kouno Hironori, Hayashi Takagi Akiko, Sato Moritoshi, Ajioka Itsuki, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 58
2. 論文標題 Near Infrared Optogenetic Genome Engineering Based on Photon Upconversion Hydrogels	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 17827 ~ 17833
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201911025	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 Yanai Nobuhiro, Suzuki Kengo, Ogawa Taku, Sasaki Yoichi, Harada Naoyuki, Kimizuka Nobuo	4. 巻 123
2. 論文標題 Absolute Method to Certify Quantum Yields of Photon Upconversion via Triplet-Triplet Annihilation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 10197 ~ 10203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.9b08636	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 Hisamitsu Shota, Miyano Junji, Okumura Keisuke, Hui Joseph Ka Ho, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 9
2. 論文標題 Visible to UV Photon Upconversion in Nanostructured Chromophoric Ionic Liquids	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemistryOpen	6. 最初と最後の頁 14 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/open.201900304	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 Kawashima Yusuke, Kouno Hironori, Orihashi Kana, Nishimura Koki, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Visible-to-UV photon upconversion in air-saturated water by multicomponent co-assembly	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Molecular Systems Design & Engineering	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/D0ME00003E	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 Joarder Biplab, Mallick Arijit, Sasaki Yoichi, Kinoshita Mika, Haruki Rena, Kawashima Yusuke, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Near Infrared to Visible Photon Upconversion by Introducing an S ² T Absorption Sensitizer into a Metal Organic Framework	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ChemNanoMat	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/cnma.202000019	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 Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Stimuli-Responsive Molecular Photon Upconversion	5. 発行年 2020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.202001325	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 Kouno Hironori, Orihashi Kana, Nishimura Koki, Kawashima Yusuke, Tateishi Kenichiro, Uesaka Tomohiro, Kimizuka Nobuo, Yanai Nobuhiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Triplet dynamic nuclear polarization of crystalline ice using water-soluble polarizing agents	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Communications	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/D0CC00836B	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 Mase Kazuma, Sasaki Yoichi, Sagara Yoshimitsu, Tamaoki Nobuyuki, Weder Christoph, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 57
2. 論文標題 Stimuli-Responsive Dual-Color Photon Upconversion: A Singlet-to-Triplet Absorption Sensitizer in a Soft Luminescent Cyclophane	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 2806 ~ 2810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201712644	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 Amemori Shogo, Gupta Rakesh Kumar, Bohm Marcus Leo, Xiao James, Huynh Uyen, Oyama Tomoki, Kaneko Kenji, Rao Akshay, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 47
2. 論文標題 Hybridizing semiconductor nanocrystals with metal-organic frameworks for visible and near-infrared photon upconversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Dalton Transactions	6. 最初と最後の頁 8590 ~ 8594
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7DT04794K	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 Hosoyamada Masanori, Yanai Nobuhiro, Okumura Keisuke, Uchihashi Takayuki, Kimizuka Nobuo	4. 巻 54
2. 論文標題 Translating MOF chemistry into supramolecular chemistry: soluble coordination nanofibers showing efficient photon upconversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 6828 ~ 6831
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CC01594E	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 Ogawa Taku, Yanai Nobuhiro, Fujiwara Saiya, Nguyen Thuc-Quyen, Kimizuka Nobuo	4. 巻 6
2. 論文標題 Aggregation-free sensitizer dispersion in rigid ionic crystals for efficient solid-state photon upconversion and demonstration of defect effects	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 5609 ~ 5615
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8TC00977E	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 Ogawa Taku, Hosoyamada Masanori, Yurash Brett, Nguyen Thuc-Quyen, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 140
2. 論文標題 Donor-Acceptor-Collector Ternary Crystalline Films for Efficient Solid-State Photon Upconversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 8788 ~ 8796
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.8b04542	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 Bharmoria Pankaj, Hisamitsu Shota, Nagatomi Hisanori, Ogawa Taku, Morikawa Masa-aki, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 140
2. 論文標題 Simple and Versatile Platform for Air-Tolerant Photon Upconverting Hydrogels by Biopolymer-Surfactant-Chromophore Co-assembly	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 10848 ~ 10855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.8b05821	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 Joarder Biplab, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 9
2. 論文標題 Solid-State Photon Upconversion Materials: Structural Integrity and Triplet-Singlet Dual Energy Migration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 4613 ~ 4624
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcclett.8b02172	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, Kouno Hironori, Hosoyamada Masanori, Ogawa Taku, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Oligo(ethylene glycol)/alkyl-modified Chromophore Assemblies for Photon Upconversion in Water	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry - An Asian Journal	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asia.201801666	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 Kimizuka Nobuo, Kouno Hiroyuki, Sasaki Yoichi, Yanai Nobuhiro	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Supramolecular Crowding Can Avoid Oxygen Quenching of Photon Upconversion in Water	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201806076	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, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 5
2. 論文標題 Recent Progress in Photon Upconverting Gels	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Gels	6. 最初と最後の頁 18 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/gels5010018	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 Haring Marleen, Abramov Alex, Okumura Keisuke, Ghosh Indrajit, Konig Burkhard, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo, Diaz Diaz David	4. 巻 83
2. 論文標題 Air-Sensitive Photoredox Catalysis Performed under Aerobic Conditions in Gel Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 7928 ~ 7938
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.joc.8b00797	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 Okumura Keisuke, Matsuki Masaya, Yamada Teppei, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 2
2. 論文標題 Sensitizer-Free Photon Upconversion in Single-Component Brominated Aromatic Crystals	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ChemistrySelect	6. 最初と最後の頁 7597 ~ 7601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/slct.201701769	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 Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 50
2. 論文標題 New Triplet Sensitization Routes for Photon Upconversion: Thermally Activated Delayed Fluorescence Molecules, Inorganic Nanocrystals, and Singlet-to-Triplet Absorption	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Accounts of Chemical Research	6. 最初と最後の頁 2487 ~ 2495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.accounts.7b00235	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 Ogawa Taku, Yanai Nobuhiro, Kouno Hironori, Kimizuka Nobuo	4. 巻 8
2. 論文標題 Kinetically controlled crystal growth approach to enhance triplet energy migration-based photon upconversion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Photonics for Energy	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JPE.8.022003	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 Hisamitsu Shota, Yanai Nobuhiro, Kouno Hironori, Magome Eisuke, Matsuki Masaya, Yamada Teppei, Monguzzi Angelo, Kimizuka Nobuo	4. 巻 20
2. 論文標題 Two-dimensional structural ordering in a chromophoric ionic liquid for triplet energy migration-based photon upconversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 3233~3240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7CP06266D	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 Mase Kazuma, Sasaki Yoichi, Sagara Yoshimitsu, Tamaoki Nobuyuki, Weder Christoph, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 57
2. 論文標題 Stimuli-Responsive Dual-Color Photon Upconversion: A Singlet-to-Triplet Absorption Sensitizer in a Soft Luminescent Cyclophane	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 2806~2810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.201712644	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 Amemori Shogo, Gupta Rakesh Kumar, Bohm Marcus Leo, Xiao James, Huynh Uyen, Oyama Tomoki, Kaneko Kenji, Rao Akshay, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Hybridizing semiconductor nanocrystals with metal-organic frameworks for visible and near-infrared photon upconversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Dalton Transactions	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7DT04794K	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 Masanori Hosoyamada, Nobuhiro Yanai, Keisuke Okumura, Takayuki Uchihashi, and Nobuo Kimizuka	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Translating MOF chemistry into supramolecular chemistry: soluble coordination nanofibers showing efficient photon upconversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CC01594E	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 Taku Ogawa, Nobuhiro Yanai, Saiya Fujiwara, Thus-Quyen Thai Nguyen, and Nobuo Kimizuka	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Aggregation-free Sensitizer Dispersion in Rigid Ionic Crystals for Efficient Solid-State Photon Upconversion and Demonstration of Defect Effects	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. C	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8TC00977E	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36件 (うち招待講演 36件 / うち国際学会 18件)

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Making Triplet Dynamic Nuclear Polarization More Accessible and Feasible
3. 学会等名 60th Experimental Nuclear Magnetic Resonance Conference (ENC 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 NIR-to-Visible Photon Upconversion for Energy Applications
3. 学会等名 International Conference on Photocatalysis and Photoenergy 2019 (ICoPP 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Functional Chemistry of Photo-excited Triplet State: from Photon Upconversion to Dynamic Nuclear Polarization
3. 学会等名 15th International Symposium on Applied Bioinorganic Chemistry (ISABC15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Near Infrared-to-Visible Photon Upconversion
3. 学会等名 China-Japan-Singapore Joint Symposium on Supramolecular Systems and Optoelectronic Functions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 Functional chemistry of triplet state
3. 学会等名 化学と生命のかけはし 2019 (東京大学大学院化学生命工学専攻) (招待講演)
4. 発表年 2019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
3. 学会等名 CCTワークショップ2019 (一般財団法人石炭エネルギーセンター) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Near infrared-to-blue photon upconversion for optogenetics
3. 学会等名 ISIPS2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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：アップコンバージョンと超核偏極
3. 学会等名 関西学院大学大学院理工学研究科 パイスター分子制御による未来型物質返還研究拠点 2019年度公開シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Functional chemistry of triplet state
3. 学会等名 the SPIRITS international symposium - Shaping self-assembled mesoscale (bio)materials with microengineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Photon Upconversion in Self-Assembled Molecular Systems
3. 学会等名 Spring Meeting of the Polymer Society of Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Photon Upconversion in Self-Assembled Molecular Systems
3. 学会等名 Department of Chemistry, University of Liverpool (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 分子集積系における励起三重項の機能化学
3. 学会等名 第6回慶應有機化学若手シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 励起三重項を機能化学する
3. 学会等名 第50回構造有機化学若手の会夏の学校 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Photon Upconversion in Self-Assembled Molecular Materials
3. 学会等名 SPIE Optics + Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Molecular Materials for Photon Upconversion
3. 学会等名 ICPAC Langkawi 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Photon Upconverting Molecular Systems
3. 学会等名 Pusan National University (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Photon Upconversion in Molecular Assemblies
3. 学会等名 10th Asian Photochemistry Conference (APC) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Functional chemistry of excited triplet state in molecular assemblies
3. 学会等名 国際ワークショップ「スピン自由度を利用した光機能性材料：合成・計測・理論のインタープレイ」(招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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：アップコンバージョンから超核偏極まで
3. 学会等名 熊本大学工学部物質生命科学科（招待講演）
4. 発表年 2019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有機材料
3. 学会等名 新化学技術推進協会（JACI）先端化学・材料技術部会 新素材分科会 講演会（招待講演）
4. 発表年 2019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分子システムの開発
3. 学会等名 第66回高分子学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2017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材料：原理と新展開
3. 学会等名 ポリマーフロンティア21「有機エレクトロニクスを支える機能性材料」（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 New Triplet Sensitization Routes for Photon Upconversion
3. 学会等名 The 4th China-Japan Joint Symposium on Inorganic and Nanomaterial Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 ネットワークに励起エネルギーを駆け巡らせる
3. 学会等名 第88回高分子若手研究会 [関西] (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Photon Upconverting Molecular and Hybrid Systems
3. 学会等名 International Symposium on Chemistry for Solar Energy Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Photon Upconversion: Current Status and Future Challenges
3. 学会等名 The Seventh Chemical Sciences and Society Summit (CS3) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Exotic Functions where Triplet State Plays a Key Role
3. 学会等名 錯体化学会第67回討論会（招待講演）
4. 発表年 2017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：過去、現在、未来
3. 学会等名 第8回 有機分子・バイオエレクトロニクスの未来を拓く若手研究者討論会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 PHOTON UPCONVERSION IN MOLECULAR ASSEMBLIES
3. 学会等名 第11回日中クラスター会議（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Photon upconversions toward enhancing renewable energy productions
3. 学会等名 The 9th Asian Conference on Organic Electronics (A-COE2017)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Coordination Chemistry for Photon Upconversion
3. 学会等名 4th Japan-Canada Joint Symposium on Coordination Chemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 分子集積化を基盤とする励起三重項の機能化学
3. 学会等名 錯体化学若手の会北陸支部勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Photon upconversion in condensed molecular systems
3. 学会等名 International Symposium on Energy Science and Technology 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Photonic Materials and Photon Upconversion
3. 学会等名 日本化学会第98春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Near infrared-to-visible photon upconversion
3. 学会等名 日本化学会第98春季年会（招待講演）
4. 発表年 2018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における次元性
3. 学会等名 日本化学会第98春季年会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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