

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21211

研究課題名（和文）金属錯体骨格中における偏極スピン生成と機能発現

研究課題名（英文）Generation and function of polarized spins in metal-organic frameworks

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では分子が光励起されることで生成する励起三重項が室温において大きな電子スピン偏極状態を取ることに着目し、そのスピン偏極状態を用いた機能開拓を目標とした。光励起後にスピン偏極した励起三重項を形成する色素を金属錯体骨格中に配位子およびゲスト分子として導入した。金属錯体骨格中に色素部位を配位子として密に導入した系においては、スピン偏極した励起三重項に加え、偏極したラジカルの生成にも成功した。ゲストとして色素分子を金属錯体骨格のナノ細孔に導入した系においては、三重項電子スピンから薬物分子の核スピンへと偏極を移行することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン偏極した励起三重項はこれまでの研究では材料などの評価手段として主に用いられてきたが、本研究ではスピン偏極した励起三重項のポテンシャルを最大限に引き出すことで機能創出に繋げることを試みた。金属錯体骨格中において色素分子の配列を精密に制御することにより、偏極した三重項に加えてラジカルを発生できることを見出し、これは室温における新しい偏極電子スピン生成法として有用であると考えられる。また、三重項電子スピンの偏極をモデル薬物分子の核スピンへと移すことにも成功し、今後の多様な生体分子や薬物分子の高感度NMR、MRI観測に繋がる重要な知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the fact that the excited triplet generated by photoexcitation of a molecule produces a large spin polarization at room temperature, and aimed to develop functions using this spin-polarized state. Dye molecules that form spin-polarized excited triplets after photoexcitation were introduced into the metal-organic frameworks as ligands or guest molecules. In the system in which the dye moiety is densely introduced into the metal-organic framework as a ligand, we succeeded in generating not only spin-polarized triplet but also polarized radicals. In the system in which a dye molecule was introduced into the nanopores of the metal-organic framework as a guest, we succeeded in transferring the polarization from the triplet electron spin to the nuclear spin of the drug molecule.

研究分野：光機能性材料

キーワード：光物性 金属錯体骨格 励起三重項 スピン

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

有機分子の光励起三重項は有機 EL や有機薄膜太陽電池など多くの有機デバイスで重要な役割を果たしている。また、最近ではフォトン・アップコンバージョンやシングレット・フィッシュンなどの現象においても励起三重項の発生や利用について多くの研究がなされてきた。光励起三重項は生成直後に特定の副準位が選択的に生成される電子偏極状態を形成するものがあり、これまで励起三重項の生成メカニズムの解明などにおいて利用されてきた。一方で偏極した励起三重項を用いた機能発現については研究例が限定的であり、有機分子の偏極三重項ならではの機能開拓が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では有機分子の偏極励起三重項の発生とその機能化を目的とし、特に金属錯体骨格をその機能発現の場として活用してきた。金属イオンと有機配位子からなる金属錯体骨格は三次元の結晶性材料であり、金属イオンと有機配位子の組み合わせを変えることで多様な骨格構造を構築することが可能である。また、合成直後に骨格中に含まれる溶媒分子を取り除くことで、ナノ多孔性の金属錯体骨格が得られることも数多く報告されている。金属錯体骨格中において偏極した光励起三重項を生成するため、金属イオンと配位結合を形成しうる部位を導入した色素配位子を新規に設計、合成し、反磁性の金属イオンと組み合わせることで金属錯体骨格中に密に配列させることを試みた。また、金属錯体骨格が持つナノ細孔を利用し、細孔中に偏極三重項を生成しうる色素分子を導入し、その電子偏極を核偏極へと移行する超核偏極の実現に取り組んだ。

3. 研究の方法

金属錯体骨格中において色素分子の配列を制御することを試みた。我々は以前の研究において、5, 12-ジアザテトラセン (DAT) が光励起三重項状態において大きな偏極率と長い偏極寿命を示し、更に空気中でも比較的安定であり、優れた偏極源分子であることを見出した (*J. Phys. Chem. Lett.* **2019**, *10*, 2208-2213)。そこで本研究ではこの DAT をベースとし、架橋配位子もしくはゲスト分子として金属錯体骨格へと導入し、偏極電子スピンの生成とその利用について検討した。

4. 研究成果

光励起後に系間交差することでスピン偏極した励起三重項を形成する DAT をベースとして、金属イオンと配位結合を形成しうる部位を導入した色素配位子を新規に合成した。この色素配位子と反磁性の金属イオンを組み合わせることで結晶性の金属錯体骨格を合成した。得られた金属錯体骨格の単結晶 X 線構造解析を行ったところ、結晶中で色素分子が密に配列し、また色素分子の配向が厳密に制御されていることが明らかとなった。また、異なる補助配位子を用いることで、色素分子の配列を様々に制御することにも成功した。

得られた金属錯体結晶の時間分解電子スピン共鳴 (ESR) 測定を行ったところ、分子分散状態にある DAT と同様にスピン偏極した励起三重項のシグナルが観測され、金属錯体骨格中において偏極した励起三重項を発生させることに成功した。配位子だけの固体からは同様の ESR シグナルが観測されなかったことから、金属錯体骨格中において色素部位の配向を精密に制御したことにより ESR シグナルの観測が可能となったことが示唆された。更に、この金属錯体骨格はパルス光の励起により遅延蛍光を示し、その遅延蛍光が磁場効果を示すことを観測した。これは光励起三重項が金属錯体骨格中に密に配列した色素間を拡散して三重項-三重項消滅を起こしていることを示唆している。今後この遅延蛍光過程をより定量的に評価していくことで、光励起三重項の偏極状態が三重項-三重項消滅過程に与える影響を明らかにできると期待される。

興味深いことに、時間分解 ESR 測定において偏極した励起三重項由来のシグナルに加え、偏極したラジカル由来のシグナルも観測された。これは三重項の偏極状態を引き継いだラジカルを発生出来ているためであると考えられ、室温において偏極したラジカルを光励起により発生するという新たな機能発現に繋がる成果が得られた。更にパルス光励起下における温度可変 ESR 測定を行うことで、偏極したラジカルが生成するメカニズムに関しても重要な知見が得られた。偏極したラジカルは核スピンの偏極率向上において有用であるため、今回見出された新たな偏極ラジカル生成法は高効率な高核偏極化手法の開発に繋がると期待される。

原子が持つ核スピンを観測する技術は化学の分野では核磁気共鳴 (NMR) 分光法、医療の現場では磁気共鳴画像法 (MRI) として応用され、それぞれの現場で欠かせない役割を果たしている。NMR や MRI の検出感度は、静磁場下で核スピンの向きがどれだけ偏っているかの状態 (核偏極) に比例する。しかし通常の室温条件では、およそ 10 万個の核スピンを用意して初めて 1 個の差ができるほど核スピンの向きの偏りは小さく、これにより NMR や MRI は他の分光法と比較して非常に感度が低いという問題を抱えている。このため、例えば MRI では人体に膨大に存在する水分子を構成する ^1H 核スピンの検出に限定されており、がんや代謝に関わる分子を画像化するこ

とは困難とされてきた。そこで核偏極を大きくするための手法の一つとして、分子の光励起三重項状態に現れる電子スピンの偏りを核スピンへと移行する動的核偏極法 (triplet-DNP) が、特に室温付近で NMR や MRI の感度を向上できる技術として注目されてきた。しかし従来の triplet-DNP では、核偏極を材料中に室温で溜め込むことは出来ても、溜め込んだ核偏極を実際に観測したい分子へ移すことは難しく、移行の効率を高めるために低温条件 (-150°C 以下) で分子の動きを固定しなければならないという課題があった。

そこで本研究では、核偏極を溜め込むための頑丈な構造を持ちながら、導入した分子に合わせ柔軟に構造を変化させられる多孔性の金属錯体骨格を利用し、DAT をその細孔中に導入し、更に細孔内に取り込んだ薬物分子に induced-fit することにより固定化し、薬物分子へと核偏極を移行することで NMR/MRI 感度を室温付近で向上することに成功した。

金属錯体骨格としては反磁性の Al イオンと重水素化したテレフタル酸からなる D-MIL-53 を合成して用いた。MIL-53 はその骨格構造を変化させながら induced-fit により多様なゲスト分子を取り込むことが知られている。プロトン核スピンの密度を下げることでプロトンのスピン格子緩和時間を長くしてより核偏極を蓄積できるようにするため、重水素化したテレフタル酸を配位子として用いた。得られた D-MIL-53 を DAT のジクロロメタン溶液に浸漬するというシンプルな方法により、ナノ細孔中に 5, 12-ジアザテトラセンを凝集することなく導入することに成功した。更にモデル薬物分子としてフルオロウラシル (5FU) を昇華法により細孔中に導入した。熱重量分析より約 40 重量% の 5FU が含まれる複合体 D-MIL-53 ⊃ [DAT+5FU] を得た。得られた複合体 D-MIL-53 ⊃ [DAT+5FU] の粉末 X 線回折測定より、ゲスト分子を含まない MIL-53 と比べて構造変化が見られ、5FU に対して induced-fit する形で構造変化が起きていることが分かった。

得られた複合体 D-MIL-53 ⊃ [DAT+5FU] に波長 527 nm のパルスレーザーを照射することで DAT の偏極した光励起三重項を生成し、その後磁場掃引を行いながらマイクロ波を照射することで三重項電子スピンからプロトン核スピンへと偏極を移行させた。この操作を繰り返すことで系中においてプロトン核スピンの偏極を蓄積し、更に cross polarization (CP) によりプロトン核からフッ素核へと偏極を受け渡し、最終的にフッ素核の NMR 信号を取得した。フッ素核はゲスト分子である 5FU にしか存在しないため、フッ素 NMR 信号が増強すれば、金属錯体骨格のナノ細孔に取り込まれたゲスト薬剤である 5FU の核偏極が増強されたことを意味する。

複合体 D-MIL-53 ⊃ [DAT+5FU] に対して triplet-DNP のプロセスを適用したところ、室温付近において約 30 倍のフッ素 NMR シグナル強度の増強が観測された (図 1)。DAT の偏極三重項電子スピンを triplet-DNP により核スピンへと移行し、更にゲスト薬剤分子である 5FU のフッ素核スピンへと偏極を移行することに成功した。これはナノ細孔中に取り込まれたゲスト分子の高核偏極化を室温付近で達成した初めての例である。これまで極低温においてラジカル電子スピンからナノ細孔中に取り込まれたゲスト分子の核スピンに偏極を移行した例は報告されているが、室温における報告例は皆無であった。その原因の一つは室温においてゲスト分子の運動性を抑えることが難しく、効率よくゲスト分子へと偏極を移行することが難しかったためであると考えられる。本研究においてはゲスト分子に対して induced-fit することで構造を変化させる金属錯体骨格を利用することで、室温においてもゲスト分子と強く相互作用することで運動性を抑えることが出来、室温における初のナノ細孔中におけるゲスト分子の高核偏極化に繋がったと考えられる。

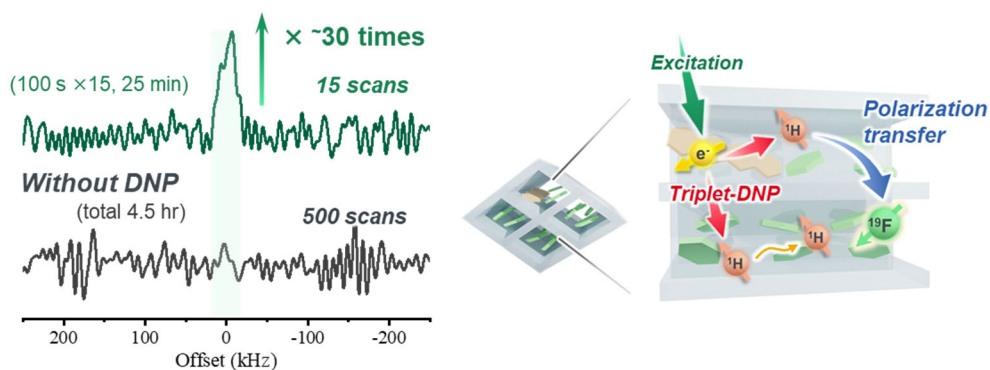


図 1 Triplet-DNP で三重項電子スピン偏極を ^1H 核スピン偏極に変換して蓄え、さらに導入した 5FU の ^{19}F 核へと移行すると、室温付近で ^{19}F -NMR 信号の増感が確認された

本研究で有機分子の偏極三重項を金属錯体骨格と組み合わせることで、偏極電子スピンを室温において発生させ、更には薬剤分子の高核偏極化という機能発現にまで繋げること成功した。金属錯体骨格は近年盛んに研究されてきた材料であり、これまでにさまざまなゲストの導入もしくは温度や圧力、光などといった物理的な刺激に応じた構造制御が報告されている。これらの知見を組み合わせることによって、多様な物理的、化学的情報のセンシングを可能にする新たな材料の開発に繋がることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 3件）

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 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 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/acsami.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 Bharmoria Pankaj, Hisamitsu Shota, Sasaki Yoichi, Kang Tejwant Singh, Morikawa Masa-aki, Joarder Biplab, Moth-Poulsen Kasper, Bildirir Hakan, M?rtensson Anders, Yanai Nobuhiro, Kimizuka Nobuo	4. 巻 9
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 11655 ~ 11661
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 該当する

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/acsami.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 -

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 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 14件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 トリプレット超核偏極の材料化学
3. 学会等名 ATI水和ナノ構造研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 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 トリプレット超核偏極の材料化学
3. 学会等名 量子生命科学会第3回大会(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 Materials chemistry of triplet dynamic nuclear polarization
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 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 トリプレット超核偏極における材料化学的アプローチ
3. 学会等名 よこはまNMR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 NIR-to-Visible Photon Upconversion for Applications in Energy and Biology
3. 学会等名 Japan-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) (国際学会)
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 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
英国	University of Sheffield			
スウェーデン	Chalmers University of Technology			