

令和 6 年 5 月 25 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K19051

研究課題名（和文）ナノ空間を有する分子性量子ビット集積体の構築

研究課題名（英文）Construction of molecular qubit assemblies with nanospaces

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） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：渡り鳥であるヨーロッパコマドリは量子コヒーレンス状態を利用して地磁気をセンシングすることで方角を知ることが出来ると考えられている。この室温かつ複雑な生態環境において機能する自然界の量子センサーに着想を得て、本研究では多様な外部環境を室温付近でセンシング可能な分子性材料の構築を目指し、実際に分子性量子ビットを密に集積した多孔性金属錯体の構築に成功した。二重項、三重項、五重項という多様な分子性量子ビットを多孔性金属錯体構造中に発生させ、それらの量子コヒーレンスを観測し、更には分子吸着にそのコヒーレンス時間が応答することを見出し、ケミカル量子センシングの実現に向けた重要な知見を得ることが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

第二次量子革命が起こる中、多様な量子技術の開発が行われている。中でも本研究では量子特有の性質を用いたセンシング技術の開発に取り組んだ。ナノレベルの細孔を有する多孔性金属錯体中に分子性の量子ビットを組み込むことで、室温においてもセンシングに活用できるほど長い量子コヒーレンス時間を維持し、細孔中に取り込んだ小分子への応答を達成し、今後の高感度な量子センサーの実現に向け重要な知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：The European robin, a migratory bird, is thought to be able to sense the geomagnetic field by using a quantum coherence state. Inspired by the quantum sensors in nature that function at room temperature and in a heterogeneous environment, we aim to construct molecular materials that can sense a variety of external environments at around room temperature, and have succeeded in constructing porous metal-organic frameworks (MOFs) with a dense accumulation of molecular qubits. Various molecular qubits - doublets, triplets and quintuplets - were generated in MOFs, and their quantum coherence was observed, and furthermore, their coherence time was found to respond to molecular adsorption, providing important insights into the realization of chemical quantum sensing.

研究分野：光機能性材料

キーワード：量子センシング 量子ビット 光励起状態 多孔性金属錯体

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子技術分野におけるイノベーションが世界的に巻き起こっており、量子情報処理や量子センシングの研究の重要性が広く認知されている。これまで研究において材料として主に用いられているのは極低温で機能する超電導量子ビットや、ダイヤモンド中に欠陥として孤立した NV 中心などである。そこでは外部からの様々なノイズを減らすことで孤立した無機材料の量子状態が用いられている。

一方で、自然界においても磁気センサーや光合成において量子もつれ効果が根幹的な役割を果たしているとして近年注目が集まっている。例えば、渡り鳥であるヨーロッパコマドリは地磁場を感じるための磁気受容体を有しており、光励起により生成するラジカル対の量子もつれ効果を利用していると考えられている。このヨーロッパコマドリの磁気センサーはノイズに満ちた生体環境で機能しており、量子もつれという量子特有の現象を有機物質が室温かつ複雑な生体環境で起こしうることを教えてくれる。

2. 研究の目的

ヨーロッパコマドリのように室温かつ複雑な生体環境において機能する自然界の量子センサーに着想を得て、ナノ細孔を材料中に分子性量子ビットを集積し、分子性量子センシング材料を創出することを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

量子ビットとしては室温で初期化可能でありコヒーレンス時間の比較的長い光励起状態を用いる。特に重金属を含まない有機分子を量子ビットとして用いることで、室温においてもスピン緩和を抑えて長いコヒーレンス時間が得られると期待される。ナノ多孔性材料としては金属イオンと有機配位子からなる多孔性金属錯体を用いる。多孔性金属錯体は高い結晶性と比表面積を有し、目的とする有機分子を配位子内に予め組み込んでおくことで多孔性構造内に精密に配置することが可能である。本研究では多孔性金属錯体中に光励起状態を形成しうる色素分子を配位子として用いることで高密度に集積化する。得られた集積体中において発生させた量子ビットの量子コヒーレンスを観測し、更には外部刺激として導入するゲスト分子に対してコヒーレンス時間の応答を観測する。

4. 研究成果

有機色素は光励起された後に一定の割合で励起一重項から励起三重項への系間交差を起こすが、その系間交差の際に励起三重項のうちの特定の副準位が選択的に生成され、電子スピン偏極を形成することが出来る。有機色素の中でもアセン化合物に代表されるように高い偏極率を示すものがあり、高い偏極率は高感度なセンシングに繋がり得る。これまで励起三重項のコヒーレンス時間は室温においても比較的長いことが知られていたが、化学物質を対象とする量子センシングに用いた例はなかった。それはこれまで量子ビットが密な結晶中やガラス中で評価され、外部からセンシングのターゲットとなる分子がアクセスできなかったためである。

そこでこの三重項量子ビットを外部環境に対して応答させるため、ナノ細孔を有する多孔性金属を用い、その細孔中にジアザテトラセン (DAT) を量子ビットとして導入した。多孔性金属錯体の中でもゲスト分子の吸着に応答して構造を変化させることが出来るアルミニウムイオンをテレフタル酸で架橋した MIL-53 を用いた。この柔軟な構造を有する多孔性金属錯体 MIL-53 の細孔中に三重項量子ビット DAT を 0.87wt% という少量を導入した複合型量子センサーの構築を行った。

パルス光照射直後の過渡電子スピン共鳴 (ESR) 測定により、MIL-53 の細孔中において DAT がスピン偏極した励起三重項を生じることが分かった。パルス ESR 測定のスピンエコーシーケンスを用いることで MIL-53 の細孔中における DAT のコヒーレンス時間を評価したところ、DAT のみが細孔中に導入された状態では約 $0.1 \mu\text{s}$ と比較的短いコヒーレンス時間が観測された。トルエン、エタノール、アセトニトリルを導入したサンプルでは DAT のエコー信号が消失し、これはゲスト分子の核スピンのノイズとして働いたためにコヒーレンス時間がより短くなったためと考えられる。一方でピリジン、フルオロウラシル、ベンゾキノン、テトラヒドロフランといった数種類のゲスト分子を導入した際には逆にコヒーレンス時間が長くなるという興味深い現象が見られた。この原因を理解するために、MIL-53 の細孔中における DAT 周辺の局所密度を評価したところ、局所密度が高いほどコヒーレンス時間が長くなる傾向があることがわかった。これは DAT の周囲がゲスト分子で満たされると DAT の運動性が抑制され、スピン緩和も抑制されるためと考えられる。量子ビットの運動性を制御することで量子コヒーレンスの応答を得るという新しいセンシングメカニズムの実証に成功した。

多孔性金属錯体中における量子ビットの位置や濃度をより精密に制御するため、配位子の一部として DAT 量子ビットの導入を行った。DAT にピリジル基を修飾した DPyDAT を配位子として用い、反磁性の亜鉛イオンと錯形成することで、ピラードレイヤー型の構造中に DAT 部位を密に

集積した多孔性金属錯体を合成した。補助配位子として 4,4'-ビフェニルジカルボン酸 (BPDC)、1,2,4,5-テトラキス (4-カルボキシフェニル) ベンゼン (TCPB)、テレフタル酸 (TA) を用いることで、構造の異なる多孔性金属錯体 DAT-MOF-1、2、3 をそれぞれ新規に合成した。過渡 ESR 測定よりこれらの多孔性金属錯体中にスピン偏極したラジカルが生成することが分かった。連続した光照射を行いながら ESR 計測を行ったところ光照射時間が長くなるにつれて ESR 信号強度が増加し、光照射によりラジカルが発生していることが分かった。また、各種 ESR 測定によりこのラジカル種の起源が配位子内に含まれる DAT のカチオンラジカルであることが示唆された。

室温でパラフィンに浸した DAT-MOF-1、2、3 のパルス ESR 測定を行ったところ、それぞれ 0.49 μ s、0.23 μ s、0.26 μ s という比較的長いコヒーレンス時間を示すことが分かった。DAT-MOF-2 および 3 の構造中において DAT 部位は周囲の分子と強い相互作用を形成しておらず、運動性が高い状態にあると考えられる。一方で DAT-MOF-1 では DAT 部位が補助配位子の BPDC と π スタッキングを形成しており、DAT の運動性が抑制されていると考えられる。すなわち DAT-MOF-1 では DAT-MOF-2 および 3 よりも DAT 部位の運動性が抑えられているため、コヒーレンス時間が長くなったことが示唆された。興味深いことに、DAT-MOF-1 中の DAT ラジカルのコヒーレンス時間はパラフィン中では 0.49 μ s であったが、パラフィンが無い条件では 0.98 μ s まで長くなることが分かった。これは、ゲスト分子を導入することで、ラジカル量子ビットのコヒーレンス時間が変化することを示している。

更により多様なゲスト分子に対する応答を得るため、DAT にカルボキシベンゼンを修飾した DATDBA を配位子として用い、Zr イオンと錯形成することにより、UiO 型の剛直な構造を有する多孔性金属錯体 DAT-MOF-4 を新規に合成した。DAT-MOF-4 の多孔性構造がゲスト分子を除去した後も安定に保たれることが粉末 X 線構造解析および窒素ガス吸着測定により確認された。DAT-MOF-1、2、3 とは異なり、DAT-MOF-4 は光照射を行わない条件においても DAT ラジカルが構造中に生成されていることが分かった。

DAT-MOF-4 の細孔中にヘキサン、トルエン、水を導入したところ、ラジカル電子スピンとゲストの核スピンの間の超微細相互作用によりコヒーレンス時間が短くなることが分かった。一方、重水素化トルエンや重水といった重水素化ゲストを導入した際にはコヒーレンス時間は長くなり、これはゲスト分子の導入によって DAT ラジカル運動性が抑制されたためと考えられる。量子ビットとゲスト分子の間の超微細相互作用に加え、量子ビット自体の運動性も重要な制御因子であることが示された。

量子センシングの高感度にはより多くのスピンを含む多重量子ビットを用いることが有効である。シングレット・フィッションとは、1つの一重項励起子が2つの三重項励起子に分裂する現象である。シングレット・フィッションが起こる過程で中間体として4つのスピンからなる五重項性の三重項励起子対 ^5TT が生成することが知られている。シングレット・フィッションでは、まず励起一重項状態 S_1 から一重項性の三重項励起子対 ^1TT が生成され、次に ^1TT が ^5TT へと系間交差により変換される。一重項性の三重項励起子対 ^1TT と五重項性の三重項励起子対 ^5TT の間のエネルギー差は2つの色素間の交換相互作用によって決まるが、このエネルギー差がある程度小さくなることで ^1TT が ^5TT への系間交差が効率良く進行するものと考えられる。そのためには色素部位の運動性によって軌道の重なりを減らし、 ^1TT と ^5TT のエネルギー差を小さくすることが重要である。このように色素部位の運動性は ^5TT を生成するために重要である一方で、色素部位の運動性が大きすぎる場合には色素の励起三重項内でのゼロ磁場分裂相互作用が揺らぐことで著しいデコヒーレンスが誘起されてしまい、量子コヒーレンスの観測が困難となる。

そこで色素部位を多孔性金属錯体中に密に集積することで、色素部位の回転運動を抑制し、シングレット・フィッションにより生じる五重項性の三重項励起子対 ^5TT の量子コヒーレンスの観測を試みた。シングレット・フィッションを効率良く起こすことで知られるペンタセンをベースとし、ペンタセンにカルボキシフェニル基を修飾した PDPA を配位子として用い、反磁性 Zr イオンと錯形成することにより UiO 型の構造を持つ多孔性金属錯体 Pn-MOF を新規に合成した。UiO 型構造によりペンタセン部位間の π スタッキングを防ぎ、 ^1TT から ^5TT への変換に十分なペンタセン部位の運動性を確保すると同時に、ペンタセン部位が密に集積することで量子コヒーレンスが保たれることを期待した。Pn-MOF の超高速過渡吸収スペクトルの測定より、励起一重項状態 S_1 から一重項性の三重項励起子対 ^1TT がピコ秒のタイムスケールにおいて生成していることが確認された。また、Pn-MOF のパルス光励起後の過渡 ESR 測定により、五重項性の三重項励起子対 ^5TT が確かに生成していることが確認された。

Pn-MOF 中における ^5TT 状態の量子コヒーレンスを観測するため、パルス ESR 測定を行った。エコー検出 ESR スペクトルにおいて ^5TT 由来の信号が得られ、100 ナノ秒を超えるコヒーレンス時間を観測することに成功した。パルス ESR のニューテーション測定を行い、その結果をペンタセン部位の動的なコンフォメーション変化を考慮したモデルを用いたシミュレーションにより解析したところ、ペンタセン平面によって形成される二面角が 22 cm^{-1} の周波数で 130° と 122° の間でわずかに変化していることが示唆された。すなわち色素部位の運動を抑制的にすることが、ゼロ磁場分裂相互作用のような異方的相互作用の大きな揺らぎを抑制し、 ^5TT 状態の量子コヒーレンスを維持する上で重要であることを見出した。

以上より二重項、三重項、五重項という多様な分子性量子ビットを多孔性金属錯体構造中に発生させ、それらの量子コヒーレンスを観測し、更には分子吸着にそのコヒーレンス時間が応答することを見出し、ケミカル量子センシングの実現に向けた重要な知見を得ることが出来た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yamauchi Akio, Tanaka Kentaro, Fuki Masaaki, Fujiwara Saiya, Kimizuka Nobuo, Ryu Tomohiro, Saigo Masaki, Onda Ken, Kusumoto Ryota, Ueno Nami, Sato Harumi, Kobori Yasuhiro, Miyata Kiyoshi, Yanai Nobuhiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Room-temperature quantum coherence of entangled multiexcitons in a metal-organic framework	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eadi3147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.adi3147	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 Orihashi Kana, Yamauchi Akio, Inoue Miku, Parmar Bhavesh, Fujiwara Saiya, Kimizuka Nobuo, Asada Mizue, Nakamura Toshikazu, Yanai Nobuhiro	4. 巻 53
2. 論文標題 Radical qubits photo-generated in acene-based metal-organic frameworks	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Dalton Transactions	6. 最初と最後の頁 872 ~ 876
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D3DT03959E	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 Sakamoto Keita, Hamachi Tomoyuki, Miyokawa Katsuki, Tateishi Kenichiro, Uesaka Tomohiro, Kurashige Yuki, Yanai Nobuhiro	4. 巻 120
2. 論文標題 Polarizing agents beyond pentacene for efficient triplet dynamic nuclear polarization in glass matrices	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2307926120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2307926120	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 62
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 e202301506
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 Yabuki Reiya, Nishimura Koki, Hamachi Tomoyuki, Matsumoto Naoto, Yanai Nobuhiro	4. 巻 14
2. 論文標題 Generation and Transfer of Triplet Electron Spin Polarization at the Solid-Liquid Interface	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 4754 ~ 4759
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.3c00627	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 Orihashi Kana, Yamauchi Akio, Fujiwara Saiya, Asada Mizue, Nakamura Toshikazu, Ka-Ho Hui Joseph, Kimizuka Nobuo, Tateishi Kenichiro, Uesaka Tomohiro, Yanai Nobuhiro	4. 巻 145
2. 論文標題 Spin-Polarized Radicals with Extremely Long Spin-Lattice Relaxation Time at Room Temperature in a Metal-Organic Framework	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 27650 ~ 27656
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.3c09563	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, Sakamoto Keita, Kawashima Yusuke, Kouno Hironori, Sato Shunsuke, Watanabe Go, Tateishi Kenichiro, Uesaka Tomohiro, Yanai Nobuhiro	4. 巻 14
2. 論文標題 Triplet dynamic nuclear polarization of pyruvate via supramolecular chemistry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 13842 ~ 13850
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D3SC04123A	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, 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 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 11
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 8002-8006.
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 μ 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 62
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 e202301506
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 Inoue Miku, Yamauchi Akio, Parmar Bhavesh, Orihashi Kana, Singh Manpreet, Asada Mizue, Nakamura Toshikazu, Yanai Nobuhiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Guest-responsive coherence time of radical qubits in a metal-organic framework	5. 発行年 2024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/D4CC01564A	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 -

[学会発表] 計24件 (うち招待講演 24件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Triplet Dynamic Nuclear Polarization: Recent Progress in Materials and Applications
3. 学会等名 Global NMR Discussion Meetings (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 トリプレット超核偏極の材料化学と生体関連分子への適用
3. 学会等名 量子生命科学会第5回大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Generation and spin polarization of radicals by photoexcitation
3. 学会等名 10TH PACIFIC SYMPOSIUM ON RADICAL CHEMISRTY (PSRC-10) (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 光励起三重項の機能化学
3. 学会等名 超分子分析化学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 光励起三重項の機能化学
3. 学会等名 合成生物化学専攻セミナー（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Optical spin polarization in chromophore assemblies
3. 学会等名 University of Sheffield（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Optical spin polarization in chromophore assemblies
3. 学会等名 Optical Probes 2023（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 量子の時代における結晶材料の挑戦
3. 学会等名 第8回有機結晶プレシポジウム（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Spin polarization in chromophore assemblies
3. 学会等名 Symposium on Manipulation and Measurement of Multiple Spin Quantum Systems at SEST 2023（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 量子の時代における材料化学者の挑戦
3. 学会等名 第1回未来物質領域セミナー（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 楊井伸浩
2. 発表標題 錯体を用いたフォトン・アップコンバージョンとスピン偏極
3. 学会等名 第5回錯体化学会フロンティアセミナー（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Materials Chemistry for Optical Spin Polarization
3. 学会等名 2024 ICReDD Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Coordination chemistry for photon upconversion, nuclear hyperpolarization, and quantum sensing
3. 学会等名 9th Asian Conference on Coordination Chemistry (ACCC9) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Materials Chemistry for Dynamic Nuclear Polarization and Quantum Sensing
3. 学会等名 University of Oxford (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024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 トリプレット超核偏極の材料化学：新偏極源と偏極対象拡大
3. 学会等名 DNP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 MOF中における量子機能の探索
3. 学会等名 九州錯体化学懇談会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Molecular Triplets as Photon-to-Spin Converters
3. 学会等名 Gordon Research Conference on Electron Donor-Acceptor Interactions（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 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 Triplet Dynamic Nuclear Polarization of Bio-relevant Molecules
3. 学会等名 SPIN CHEMISTRY MEETING 2022 (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 トリプレットを用いた生体関連分子の超核偏極
3. 学会等名 第 22 回若手 NMR 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 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 楊井伸浩
2. 発表標題 分子性材料の光励起三重項を用いたスピン機能
3. 学会等名 未来材料セミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuhiro Yanai
2. 発表標題 Exploring spin functions in metal-organic frameworks
3. 学会等名 アジア国際シンポジウム 無機化学ディビジョン / 錯体化学・有機金属化学ディビジョン , 日本化学会 第103 春季年会 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023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		
ドイツ	ヨハネス・グーテンベルク大学 マインツ		