

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (特設分野研究)

研究期間：2017～2020

課題番号：17KT0099

研究課題名(和文) 表面光化学反応遷移状態への動的アプローチ

研究課題名(英文) Dynamical Approach to Investigate Transition State on the Surface Chemical Reactions

研究代表者

山田 剛司 (Yamada, Takashi)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：90432468

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：分子が吸着した固体表面における光化学反応は、分子-基板間における化学結合の切断と生成を伴う過程が存在し、固体表面と分子との間の電荷のやりとりが反応開始のきっかけとなりうる。分子の非占有準位に電子が注入されたあと、遷移状態を経て脱励起状態に至るまでに蛍光・りん光を伴った失活や無輻射失活が起こることがある。本研究では、この遷移状態の解明に興味を持ち、この過程をフェムト秒スケールで追跡できる時間分解2光子光電子分光の測定系を整備した。多環芳香族炭化水素分子による吸着系をモデルに用い、吸着分子が作る構造を制御することで光励起時の遷移状態や、脱励起時の発光が制御可能であることを示すことが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、有機発光デバイスが実用化されていることもあり、分子からの発光は特に注目が集まっている。効率の良い有機発光デバイスを実現するためには、分子からの発光機構の解明や、分子-電極界面で起こっている電荷の挙動を探ることが不可欠となる。また、励起された電荷の遷移状態の解明は、有機発光デバイスの逆過程である有機太陽電池の理解にも役立つ。本研究では、電極表面上に吸着した多環芳香族炭化水素を対象に、分子からの発光をフェムト秒スケールで追跡する装置を新たに構築した。表面上での分子の配列を制御し、電荷の超高速ダイナミクスを追跡することによって、発光の有無や、発光色を制御することが可能であることが示された。

研究成果の概要(英文)：On the photochemical reactions occurring on the solid surfaces, charge injection from the surface to the molecule can be a trigger to start the reaction. When the electrons are excited into unoccupied states, a transient state can be formed as a tentative moment, which finally decayed with photoluminescence, phosphorescence, or non-radiative decay. In this study, we focus on transient state formation and decay with photoluminescence. To achieve the subject, we constructed a time-resolved two-photon photoemission system with a femtosecond time resolution. We adopted polyaromatic hydrocarbons as a model system. By controlling the surface structure by adsorbates, we have successfully shown that we can regulate the transient state and photoluminescence from the film.

研究分野：物理化学

キーワード：光化学反応 遷移状態 2光子光電子分光 走査トンネル顕微鏡 単分子膜 有機半導体 蛍光

1. 研究開始当初の背景

表面化学反応が関与する研究領域や研究対象は非常に多岐にわたり、触媒反応、電極表面反応、半導体プロセス、摩擦現象など、枚挙にいとまがない。20世紀中には超高真空技術の発展や、各種表面分析装置の開発が進み、原子・分子レベルで微視的反應機構の解明を指向した研究例が多数報告されるようになってきた。このうち、電子状態・振動状態・吸着子による表面構造など「静的な」情報についてはかなり精度よく得られるようになり、理論研究との二人三脚も軌道に乗りつつある。一方で、上記情報の時間発展や反応遷移状態を含む動的な情報を捉えたという研究例は少なく、表面化学反応遷移状態に関する知見はかなり乏しい。表面の反応性はいったいどこから生まれるのか？化学結合の切断や生成はどのように進行するのか？といった、表面化学反応の反応遷移状態における本質的な問いに答えることは重要な課題の一つである。

上記課題を明確にするために、固体表面における表面光化学反応に注目する。図1に示すように、光励起によって吸着分子の占有準位から非占有準位に入ることによって電子が励起されると、分子は反応遷移状態に移行する。つまり、非占有準位に電子が入ることで分子-基板間結合エネルギーが不安定になり、表面化学反応開始のきっかけとなる。励起過程として、分子内・占有-非占有準位間の直接遷移や、基板から分子への電子移動が考えられている。光励起を伴わない、溶液中の電極表面反応でも、固体表面から非占有準位への電子移動によって分子-基板間化学結合が不安定となり、表面での化学反応が進行するきっかけとなりうる。

非占有準位に電子が注入されたあと、遷移状態を経て、分子がそのまま表面から離れる脱離や、別の分子種に分解される解離が起き、表面化学反応が進行していく。脱離と解離を分かつ原因は、分子内結合エネルギーと分子-基板間結合エネルギーの大小に左右されるため、各吸着系について個別に論じる必要がある。さらに、電子励起状態から脱励起状態に至るまでに蛍光・りん光による脱励起や無輻射失活が起こることがある。本研究では、発光過程に注目して研究を行った。励起状態から脱励起がおこるまでを追跡し、発光に至るまでの時分割情報や、発光制御に直結する知見を得ることを目指す。

2. 研究の目的

一般的な傾向としては、ファンデルワールス力で表面に物理吸着した分子の場合には脱離が優勢におき、強い化学結合で吸着した分子では解離が起きることが多い。両者を識別するには、基板の電子状態を含めた分子吸着界面での電子状態計測が必要となる。本研究では、分子吸着表面において、非占有準位の電子状態を計測し、非占有準位に励起された電子の時間発展を詳細に計測することを目的とする。これにより、光励起直後からの分子配向の変化や、表面における化学結合の切断と生成を伴う化学反応遷移状態のポテンシャル描像、脱励起時の発光の様子をフェムト秒時間スケールで捉えることを目指す。

表面における化学反応

非占有準位へ
電子が励起 ⇒ 反応開始

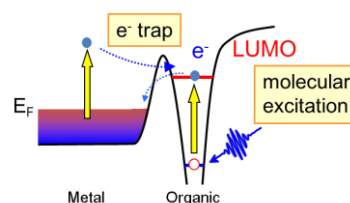


図1 表面における光化学反応のメカニズム。分子内励起や電極からの電荷移動によって非占有準位に電子が注入され、反応開始のきっかけとなる。

3. 研究の方法

分子吸着表面の非占有準位計測には2PPE(図2)を用いる。2PPEの光源には波長可変・フェムト秒短パルスレーザーの高調波を用いる。2PPEでは、占有準位からの2光子同時吸収によって放出された光電子の運動エネルギーを超高真空中で計測することにより、占有準位を計測することができる。また、ポンプ光で電子を非占有準位に励起し、電子励起遷移状態が形成された後、プローブ光で真空準位上に励起した光電子の運動エネルギーを計測することで、非占有準位に入った電子のエネルギー位置も同様に決定できる。真空中で検出された光電子は占有・非占有準位の情報を含む。波長可変測定を行い、励起波長に対し電子の運動エネルギーをプロットすることで両者の識別が可能である。

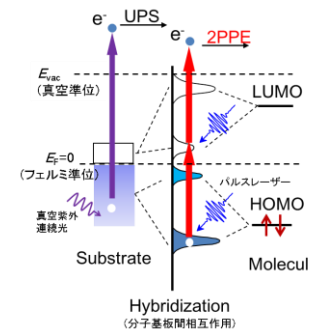


図2 UPS(紫外光電子分光 連続光源)による占有準位励起(左)と2PPE(レーザー光源)における光励起素過程(右)。

また、ポンプ・プローブパルス間で遅延時間を設けると、時間分解2PPEへと展開でき、非占有準位に励起された電子の時間発展を知ることができる(図3)。ステージ遅延距離と光電子エネルギー分析器を同期制御し、遅延時間ごとにスペクトルを取得するよう、光路・測定装置をくみ上げる。

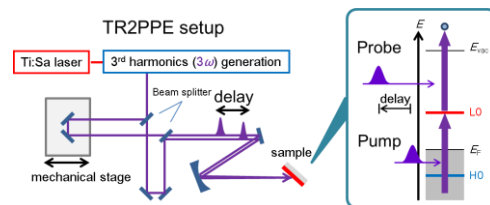


図3 時間分解2PPEにおける光路図。非占有準位に励起された電子の寿命が計測できる。ステージ移動距離 $0.15 \mu\text{m}$ が光遅延時間 1fs に相当する。

固体表面の吸着分子系における光反応において、基板が果たす役割は非常に大きいと考えられる。この効果を検証するために、単分子層膜程度の分子膜において、光励起後の遷移状態を計測する。本研究では、光源のレーザーが波長可変であるため、分子の非占有準位に選択的に電子を直接励起することが出来る。励起後の電子状態の時間発展を測定し、発光に至るまでの遷移状態(分子配向の変化、発光に伴う電子状態変化等)を実時間観測する。分子配向の変化・電子局在化に伴う電子状態の時間変化は、仕事関数の変化や、非占有準位のエネルギー変化(安定化)、角度分解測定における光電子の空間的広がりにあらわれてくるため、これらを検出する時間・角度分解2PPEの手法を用いる

4. 研究成果

(1) 典型的な有機半導体であるペリレンについて、薄膜の構造と光物性に関する研究を行った。グラファイト基板上にペリレン単分子膜を作製し、超構造を走査トンネル顕微鏡(STM)で観察した(図4)。STMは鋭利な金属探針を数原子程度の距離(数Å)まで表面に近接させ、表面上を2次元走査させつつ、流れるトンネル電流を実空間・ナノスケールで画像化する手法である。これにより、単一分子レベルで構造を規定できる。同時に、低速電子線回折(LEED)を用いて構造を評価した。LEEDは単色化された電子線を用い、回折像から表面超構造の周期性を精密に規定する手法である。STMは実空間において単分子レベルでの構造観察を可能とするが、熱ドリフトや走査用ピエゾ素子の歪みに起因する距離計測誤差が無視できない程度に存在する。精密構造解析のためには顕微鏡法(STM)のみを用いるこ

とは不十分であり、巨視的な情報を含む回折法 (LEED) と組み合わせることで解析の精度が担保される。

構造観察の結果、低温 (80 K) では分子は 2 量体を形成し、基板に対し分子長軸を立てて吸着することが判明した。この単分子膜を紫外光で励起すると、橙色 (約 610 nm) の蛍光放出が見られ、励起 2 量体 (エキシマ) からの発光に由来することが分かった。目視で確認できる強度で単分子膜からの蛍光が観察されることはこれまでほとんど報告がなく、注目に値する。なお、室温付近では 2 量体構造は見られず、単分子に由来する緑色の蛍光が観察された。吸着構造の温度依存性を微視的視点から捉えることにより、蛍光放出特性との相関が明らかになった。

(2) 時間分解 2PPE 測定におけるパルス遅延光路の整備を行い (図 3)、ポンプ・プローブ遅延時間ごとに 2PPE スペクトルが得られるように装置の改良を行った。時間分解 2PPE をペリレン単分子膜に適用した結果を図 5 に示す。LUMO、HOMO 準位のほかに表面鏡像準位 (IPS) の寿命を捉えることが出来た。いずれも寿命は 50~60 フェムト秒程度と見込まれ、寿命を評価できる下限に近い値となった。単分子層レベルでは、非占有準位 (LUMO、LUMO+1) に励起された電子の失活は非常に早い時間スケールで起こる。これは吸着分子の電子状態が基板の電子状態とまじりあっているため、基板に無輻射失活していく電子・正孔の寿命の短さを反映している。一方で、LUMO よりもさらに 0.7 eV 程度低いエネルギー位置において数 100 ピコ秒程度以上の長い寿命を持つ非占有準位が観測にかかった。同時に観測された発光分光の結果と併せて考えると、2 量体による励起準位であることが同定された。脱励起時の発光に関与する占有・非占有準位を特定することが可能となった。

(3) (1) で構造を規定したペリレン薄膜について、角度分解 2PPE を行うことで分子配向と非占有準位の相関を検討した。室温・単分子層以下の膜厚においては、分子は基板に対して寝て吸着する。角度分解 2PPE の結果から、表面鏡像準位と非占有準位との軌道混成により、特定の非占有準位 (Lx) のピーク強度が有意に大きくなる現象を見出した。低温では (1) で規定したように、分子が立って配向するため、基板との距離が離れるために電子状態との軌道混成の兆候は見られなかった。基板温度を制御することによって分子の配向制御

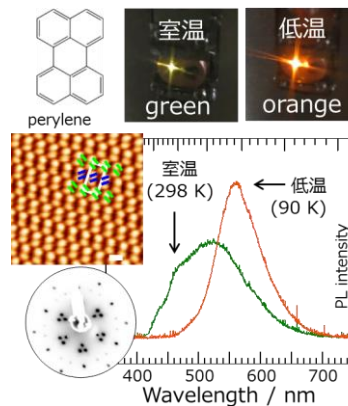


図 4 (左)ペリレン単分子薄膜における STM 像 (10 nm X 10 nm) と LEED パターン。(右)単分子膜の蛍光強度の温度依存性を計測した結果。励起波長は 266 nm。山田ら, J. Phys. Chem. C (2020)。

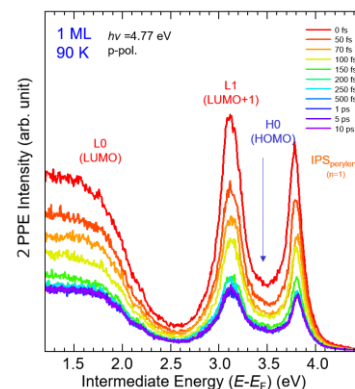


図 5 ペリレン単分子薄膜における時間分解 2PPE の結果。山田ら (論文投稿中)

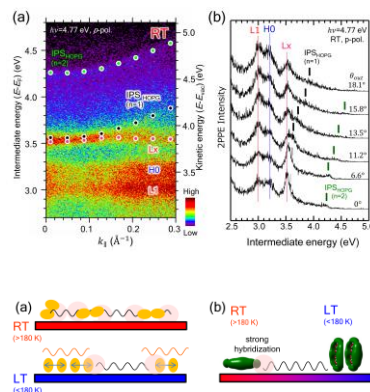


図 6 ペリレン単分子薄膜における角度分解 2PPE の結果。山田ら, J. Chem Phys. (2019)。

が可能となり、結果非占有電子状態における軌道混成を変調することが可能であることを示した。

(4)ペリレンより分子量が小さい、最小かつ安定に存在する2次元芳香族炭化水素であるピレン分子による同様の実験を行い、構造・電子状態・発光の相関を比較検討した。STM(走査トンネル顕微鏡)やLEED(低速電子線回折)による構造観察では、単分子層

ができていることが判明しており、分子面が基板に平行な、いわゆる寝た配向を取る。基板温度によって分子画面内方向で構造転移し、その構造周期性が変わることも判明した。一方で、ペリレンの場合とは異なり、単分子膜からの発光は観測にかからなかった。分子が寝た配置を採っているため、基板の電子状態との混成が大きく、励起後の分子の失活が早いためであると考えられる。一方で低温吸着時には分子が凝集構造を取る。凝集層にレーザー励起を行うと、紫外領域に近い波長で蛍光発光が起きていることを確認した(図6挿入図の写真)。(2)(3)のペリレンの系と比較すると、2量体分子による特異的な凝集構造が可視域での発光の有無に関係があるものと思われる。

(1)-(4)で示した例のように、構造を制御することで光励起時の遷移状態や、脱励起時の発光が制御可能であることを、いくつかの分子吸着系で示すことが出来た。

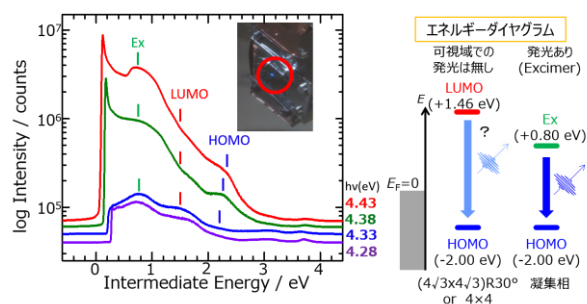


図6 ピレン分子薄膜における2PPEの結果。単分子膜では発光が起こらないが、分子凝集層を形成すると発光が見られる。山田ら、(投稿準備中)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Okaue D., Hayashi R., Wakayama K., Ito N., Munakata T., Yamada T.	4. 巻 709
2. 論文標題 Lateral Distribution of Optical Excitation at Boundaries around Rubrene Islands Visualized by Microspot Two-Photon Photoemission Spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Surface Science	6. 最初と最後の頁 121847 ~ 121847
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.susc.2021.121847	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 Kirchhuebel Tino, Kera Satoshi, Munakata Toshiaki, Ueno Nobuo, Shiraishi Ryo, Yamaguchi Takuma, Yonezawa Keiichirou, Ueba Takahiro, Bussolotti Fabio, Yang Jinpeng, Yamada Takashi, Mori Ryosuke, Kunieda Shogo, Huempfner Tobias, Gruenewald Marco, Forker Roman, Fritz Torsten	4. 巻 124
2. 論文標題 Role of Initial and Final States in Molecular Spectroscopies: Example of Tetrphenyldibenzoperiflanthene (DBP) on Graphite	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 19622 ~ 19638
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c05448	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 Yamada Takashi, Araragi Kento, Kato Hiroyuki S., Munakata Toshiaki	4. 巻 124
2. 論文標題 Structural Characterization and Photoluminescence Properties of Monolayer Perylene on a Graphite Surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 12485 ~ 12491
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c02419	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 Yamada Takashi, Ito Natsumi, Kawakita Noriaki, Kato Hiroyuki S., Munakata Toshiaki	4. 巻 151
2. 論文標題 Formation and regulation of unoccupied hybridized band with image potential states at perylene/graphite interface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 224703 ~ 224703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5126373	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 Osumi Yuji, Yamada Takashi, Ie Yutaka, Kato Hiroyuki S.	4. 巻 123
2. 論文標題 Deviation from Point Dipole Analysis for Exciton Quenching in Quaterthiophene-Terminated Self-Assembled Monolayers on Au(111)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 16127 ~ 16136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b01801	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 Yamada Takashi, Kawakita Noriaki, Okui Chiaki, Munakata Toshiaki	4. 巻 31
2. 論文標題 Hybridization of an unoccupied molecular orbital with an image potential state at a lead phthalocyanine/graphite interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 044004 ~ 044004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/aaf08e	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 Yamada Takashi, Munakata Toshiaki	4. 巻 93
2. 論文標題 Spectroscopic and microscopic investigations of organic ultrathin films: Correlation between geometrical structures and unoccupied electronic states	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress in Surface Science	6. 最初と最後の頁 108 ~ 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.progsurf.2018.09.003	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 Yamada Takashi	4. 巻 12
2. 論文標題 Unoccupied States Measurements, Spatial Mapping, and Nanoscale Structures of Organic Ultrathin Films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Molecular Science	6. 最初と最後の頁 A0098 ~ A0098
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3175/molsci.12.A0098	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 Yamada Takashi, Kinoshita Mariko, Araragi Kento, Watanabe Yu, Ueba Takahiro, Kato Hiroyuki S., Munakata Toshiaki	4. 巻 20
2. 論文標題 Direct visualization of diffuse unoccupied molecular orbitals at a rubrene/graphite interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 17415 ~ 17422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CP01796D	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 Kato Hiroyuki S., Murakami Yoshinari, Saitoh Riyo, Osumi Yuji, Okaue Daijiro, Kiriya Yoshiaki, Ueba Takahiro, Yamada Takashi, Ie Yutaka, Aso Yoshio, Munakata Toshiaki	4. 巻 669
2. 論文標題 Influence of molecular distortion on the exciton quenching for quaterthiophene-terminated self- assembled monolayers on Au(111)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Surface Science	6. 最初と最後の頁 160 ~ 168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.susc.2017.11.014	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 N. Kawakita, T. Yamada, M. Meissner, R. Forker, T. Fritz, and T. Munakata	4. 巻 95
2. 論文標題 Metastable phase of lead phthalocyanine films on graphite: Correlation between geometrical and electronic structures	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 45419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.95.045419	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29件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 T. Yamada and H. S. Kato,
2. 発表標題 Photoluminescence Properties and Excited-State Dynamics of Ultrathin Molecular Films on Graphite
3. 学会等名 Joint Symposium of JSPS-DST Bilateral Research Project " Charge-and Spin-Blockade in Ultrathin-Layers of Single Molecule (国 際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Riku Muneyasu, Takashi Yamada, Hiroyuki S. Kato
2. 発表標題 Stratified by Covalent and Hydrogen bonds on Au(111) surfaces
3. 学会等名 Joint Symposium of JSPS-DST Bilateral Research Project " Charge-and Spin-Blockade in Ultrathin-Layers of Single Molecule (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田和大典, 山田剛司, 加藤浩之
2. 発表標題 グラファイト表面上に吸着したピレンの吸着構造および電子状態の観測
3. 学会等名 2020年表面界面スペクトロスコピー
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 棟安陸, 山田剛司, 加藤浩之
2. 発表標題 階層的なAu-S結合と水素結合による異種二分子膜の自己組織化過程に関する研究
3. 学会等名 関西薄膜表面物理セミナー
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田和大典, 山田剛司, 加藤浩之
2. 発表標題 グラファイト表面上に吸着したピレンの吸着構造および電子状態の観測
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 棟安陸, 山田剛司, 加藤浩之
2. 発表標題 水素結合と Au-S結合による異種二分子膜の階層的な自己組織化
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 棟安陸, 山田剛司, 加藤浩之
2. 発表標題 階層的なAu-S結合と水素結合による異種二分子膜の自己組織化過程に関する研究
3. 学会等名 第13回分子科学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 MUNEYASU, Riku; YAMADA, Takashi; KATO, Hiroyuki
2. 発表標題 Study on Assembly of the Heterogeneous Bilayer Based on a Thiolate Self-assembled Monolayer on Au(111) Substrates
3. 学会等名 日本化学会第100春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Yamada, Natsumi Ito, Noriaki Kawakita, Kento Araragi, Hiroyuki S. Kato and Toshiaki Munakata
2. 発表標題 Structural Characterization and Photoluminescence Properties of Cofacial Perylene Dimer on Graphite, 「グラファイト表面上のペリレン単分子膜のダイマー構造と蛍光特性」
3. 学会等名 表面界面スペクトロスコープ-2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田剛司, 伊藤菜摘, 河北徳明, 蘭堅斗, 加藤浩之, 宗像利明
2. 発表標題 時間分解2光子光電子分光によるペリレン単分子膜の電子励起ダイナミクス
3. 学会等名 第12回分子科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大隅悠史, 山田剛司, 加藤浩之
2. 発表標題 X線反射率法による機能性単分子膜の構造解析と励起子減衰機構の同定
3. 学会等名 第12回分子科学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Yamada, Natsumi Ito, Noriaki Kawakita, Kento Araragi, Hiroyuki S. Kato and Toshiaki Munakata
2. 発表標題 Structural Characterization and Photoluminescence Properties of Cofacial Perylene Dimer on Graphite
3. 学会等名 Okazaki Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 剛司
2. 発表標題 有機超薄膜の非占有準位・分光イメージングとナノスケール構造観察
3. 学会等名 第11回分子科学討論会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Yamada, Natsumi Ito, Noriaki Kawakita, Kento Araragi, Hiroyuki S. Kato, Toshiaki Munakata
2. 発表標題 Unoccupied electronic states and excited dimer formation at the perylene/graphite interface
3. 学会等名 9th Workshop on Advanced Spectroscopy of Organic Materials for Electronic Applications (ASOMEA-IX) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Yamada
2. 発表標題 Spectroscopic and microscopic investigations of unoccupied states at the organic/substrate interface
3. 学会等名 SFB1083, Special Seminar, Philipps-Universitat Marburg, Marburg, Germany (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大隅悠史, 山田剛司, 加藤浩之
2. 発表標題 単分子膜中の光励起種の寿命における分子構造の影響: 基板 - 励起官能基間の距離を関数としたモデル解析
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田剛司
2. 発表標題 有機分子/基板界面における物性研究-構造と電子状態-
3. 学会等名 第40回有機物性研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田剛司, 蘭堅斗, 伊藤菜摘, 河北徳明, 加藤浩之, 宗像利明
2. 発表標題 ペリレン超薄膜における非占有準位計測と構造・発光
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会(2018年)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田 剛司, 蘭 堅斗, 伊藤 菜摘, 河北 徳明, 加藤 浩之, 宗像 利明
2. 発表標題 ペリレン超薄膜の非占有電子状態・構造・発光
3. 学会等名 関西薄膜・表面物理セミナー
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森 良亮, 國枝 省吾, 山田 剛司, 加藤 浩之, 宗像 利明
2. 発表標題 DBP/HOPG界面の電子励起ダイナミクス
3. 学会等名 第10回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡上 大二郎, 林 良祐, 山田 剛司, 宗像 利明
2. 発表標題 ルブレン薄膜における非占有準位空間分布の顕微2光子光電子分光測定
3. 学会等名 第10回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田 剛司, 伊藤 菜摘, 河北 徳明, 加藤 浩之, 宗像 利明
2. 発表標題 2光子光電子分光によるペリレン薄膜の電子状態
3. 学会等名 第10回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 蘭 堅斗, 木下 真梨子, 渡辺 悠, 上羽 貴大, 山田 剛司, 加藤 浩之, 宗像 利明
2. 発表標題 グラファイト上ルブレンにおける非局在化した非占有分子準位の可視化
3. 学会等名 第10回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森良亮, 國枝 省吾, 山田剛司, 加藤浩之, 宗像利明
2. 発表標題 DBP/HOPG界面の電子励起ダイナミクス
3. 学会等名 第12回 有機デバイス・物性院生研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 蘭 堅斗, 木下 真梨子, 渡辺 悠, 上羽 貴大, 山田 剛司, 加藤 浩之, 宗像 利明
2. 発表標題 グラファイト上ルブレンにおける非局在化した非占有分子準位の可視化
3. 学会等名 第12回 有機デバイス・物性院生研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田 剛司
2. 発表標題 有機分子超薄膜の構造と非占有電子状態
3. 学会等名 第12回 有機デバイス・物性院生研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Yamada, Natsumi Ito, Noriaki Kawakita, Kento Araragi, Hiroyuki Kato, Toshiaki Munakata
2. 発表標題 Unoccupied Electronic States at the Perylene/Graphite Interface Investigated by 2PPE
3. 学会等名 5th Ito International Research Conference, RIKEN Centennial Anniversary & Surface and Interface Spectroscopy 2017 (IIRC5) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Daijiro Okaue, Ryosuke Hayashi, Takashi Yamada, and Toshiaki Munakata
2. 発表標題 Lateral Distribution of Unoccupied Levels on Rubrene Thin Films Measured by Micro-Spot Two-Photon Photoemission
3. 学会等名 Interdisciplinary Symposium for Up-and-coming Materials Scientists (ISUMS) 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Yamada, M. Kinoshita, K. Araragi, T. Ueba, H. S. Kato and T. Munakata
2. 発表標題 Direct visualization of localized/delocalized nature of unoccupied states at the rubrene/graphite interface
3. 学会等名 "Symposium on Surface Science & Nanotechnology -25th Anniversary of SSSJ Kansai-" (SSSN-Kansai) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究者個人ホームページ http://www.chem.sci.osaka-u.ac.jp/lab/akai/member/yamada/yamada.html 研究代表者 所属機関ホームページ http://www.chem.sci.osaka-u.ac.jp/lab/akai/ 研究代表者 リサーチマップ https://researchmap.jp/tks-ymd 研究代表者 所属機関 研究者総覧 https://rd.ia.i.osaka-u.ac.jp/en/dc874508ccdce898.html
--

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1件

国際研究集会 International Symposium on Spectroscopy and Dynamics at Surface and Interface	開催年 2018年～2018年
---	--------------------

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	イエナ大学			
中国	揚州大学			