

令和 6 年 4 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01917

研究課題名(和文) 分子の羽ばたきを鍵とした超低閾値の局所粘度・局所応力イメージング

研究課題名(英文) Flapping Molecules for Local Force / Local Viscosity Imaging with Ultra-low Threshold

研究代表者

齊藤 尚平 (SAITO, Shohei)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30580071

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：高分子物理研究に最適な約100 pNに応答閾値をもつ蛍光レシオ型のForce Probe (FLAP)を開発した。FLAPの化学ドーピングする箇所を制御することで、破断前の架橋高分子において架橋点には主鎖よりも局所応力が集中しており、破壊の起点となりやすいことを示した。また、エラストマーの延伸や高分子ゲルの圧縮に対して、不均一な応力分布を蛍光イメージングで定量追跡した。さらに、高分子材料の強靱化に寄与する「歪み誘起結晶化」の状態を光学的に追跡する手法を開拓し、分子鎖の延伸と結晶化は同時ではなく段階的に起こることを示した。また、FLAPを環境応答プローブとして活用しソフトマター物理の発展に貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数pNの力の観測を狙った「FRET型フォースプローブ」を扱うメカノバイオロジーと、共有結合の開裂に200 pN以上の力を必要とする「メカノフォア」を扱う高分子メカノケミストリーは、同じ「力を見る科学」でありながら、10年間に渡って2つの分野が交差しなかった。その理由は、扱っている上記の蛍光システムが応答する力の閾値が全く異なるためである。一方で、分子鎖の破壊を伴わない絡まった分子鎖の変形を扱う高分子物理では、共有結合の切断よりも低く、なおかつ熱揺らぎを十分に上回る応答閾値をもつ新たなフォースプローブが必要であった。本研究では高分子物理の追跡に最適なプローブを開発し、実際に新知見を開拓できた。

研究成果の概要(英文)：A ratiometric fluorescent force probe (FLAP) with a response threshold of about 100 pN, ideal for polymer physics research, has been developed. By controlling where FLAP is chemically doped, we showed that local stress is more concentrated at the cross-linking sites than at the main chains in cross-linked polymers prior to fracture, making them more likely to be the starting points for fracture. The non-uniform stress distribution was quantitatively tracked using fluorescence imaging for elastomer stretching and polymer gel compression. We also pioneered a method of optically tracking the state of 'strain-induced crystallization', which contributes to the toughening of polymeric materials, and showed that stretching and crystallization of molecular chains occur stepwise rather than simultaneously. New insights into soft matter physics was developed by using FLAP as an environmental response probe, monitoring the local force, the local viscosity, and the single polymer free volume.

研究分野：液晶・高分子化学、光化学、構造有機化学

キーワード：フォースプローブ 材料イメージング ソフトマテリアル メカノケミストリー 応力集中 ゲル エラストマー FLAP

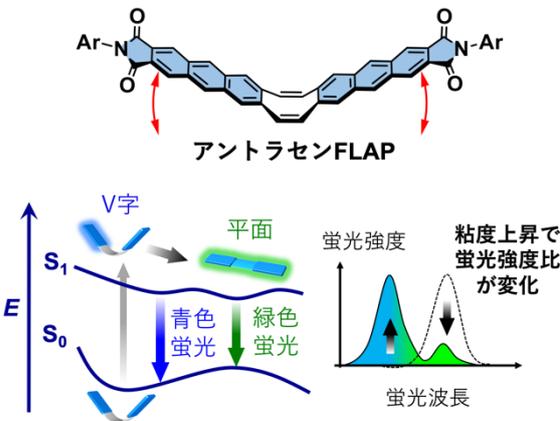
科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

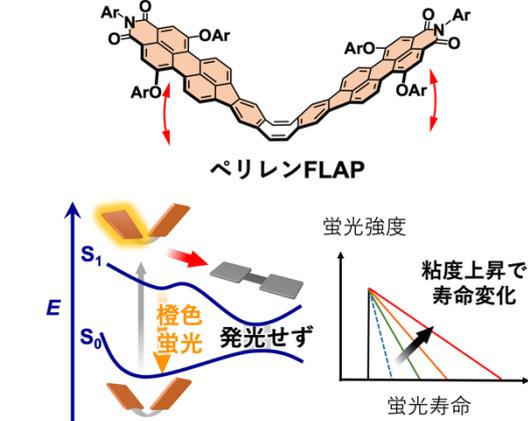
不均一な系において、局所的な環境の偏り（たとえば、流れ場における局所粘度や、変形した高分子の局所応力集中）を定量的に評価することは、基礎科学のみならず工業的にも重要である。回転粘度計をもちいた粘度の測定や、偏光カメラを用いたムラの可視化など、物理的な計測手法は対象物の化学構造を無視して連続体として扱っていることから、分子レベルでの局所環境の知見は得られない。これに対し、環境応答性の蛍光プローブをほんの少しだけ対象物質に分散させる化学アプローチでは、ナノスケールの環境変化が蛍光シグナルに反映される。ただし、蛍光分子が理想的に均一な分散をするとは限らないので、単純な蛍光強度は解析に用いることができず、分子の濃度に依存しない「蛍光スペクトルの形（異なる波長における蛍光強度比；蛍光レシオ）」または「蛍光寿命」などから局所環境を定量する必要がある（次頁）。本研究では、レシオ型・寿命型を問わず、従来の粘度プローブ・応力プローブではカバーできていなかった低閾値の環境変化を追跡できる独自の羽ばたく蛍光プローブを開発し、運用することで、概要に示したような過去にない科学技術の開拓を目指す。

羽ばたく蛍光粘度プローブ

○ 蛍光レシオ型 JACS 2013, JMCC 2017



○ 蛍光寿命型 Angew Chem 2020, BCSJ 2020

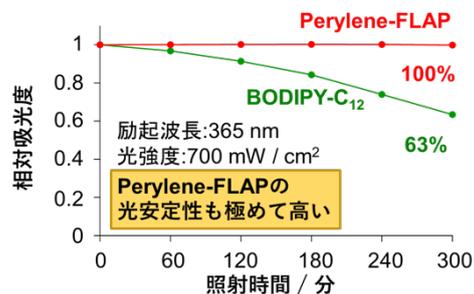
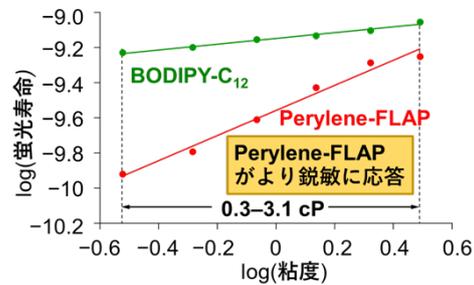
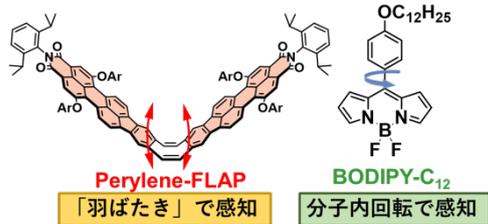


2. 研究の目的

独自に開拓した羽ばたく蛍光分子群は、分子が置かれた局所環境に依存して、柔軟かつ大きなπ共役構造の変換を伴い、蛍光スペクトルや蛍光寿命を変化させる。これらは「粘度プローブ」および「応力プローブ」として機能し、粘度では1-10 cP（センチポアズ）、力では10-100 pN（ピコニュートン）という低閾値において、動く観察対象の局所における粘度分布や力の偏りを解明できる。これにより、市販装置を用いた物理的アプローチや従来の環境応答蛍光プローブでは実現不可能な、新しい科学技術の開拓を目指す。

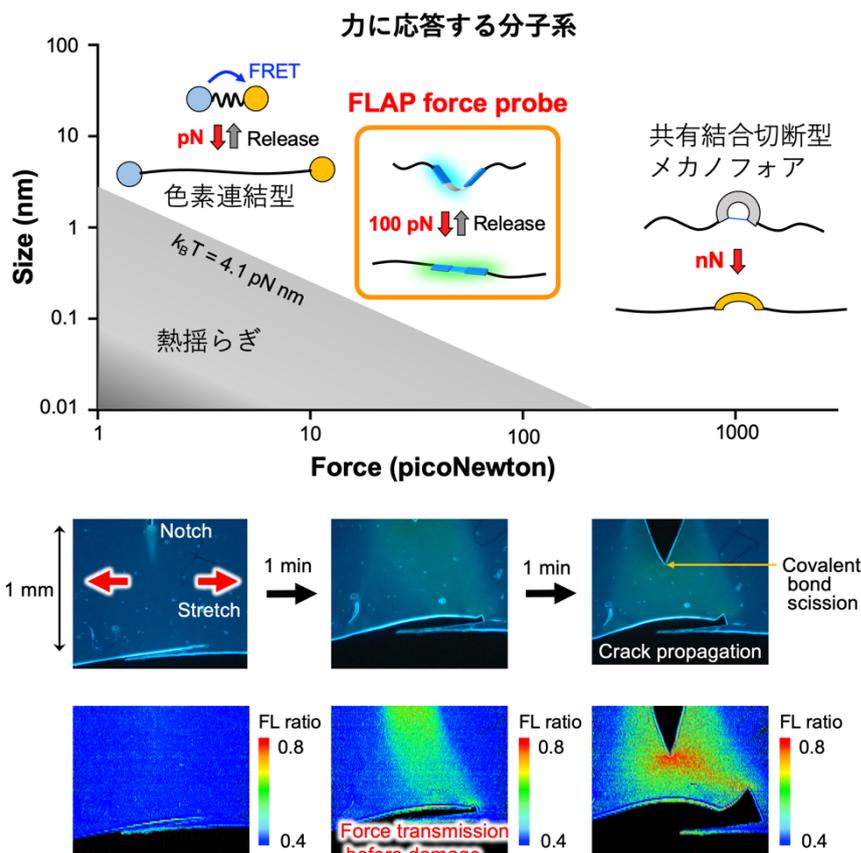
一般的な粘度プローブ BODIPY-C₁₂ (右) は、分子内結合の回転運動が局所粘度の影響を受ける蛍光寿命型プローブであり、通常 10 cP 以上の粘度範囲で用いられる。FLAP はそれらの「回転型」粘度プローブとは根本的に異なる「羽ばたき型」粘度プローブであり、励起状態(S₁)における平面化に伴って分子が大きく動くため、極めて低粘度領域の 1-10 cP において特に顕著な蛍光特性の変化を示す(右図)。また、周囲の極性の影響をあまり受けずに、高い光安定性をもつようにも設計できる。ここでは、不均一流体における局所粘度の定量技術を医療診断に応用することに挑戦する。すなわち、微量量の血液で血漿（血液の液体部分）の粘

粘度を感じる原理が異なる



度を迅速に定量するシステムを開発し、血漿粘度と健康リスクに未知の相関がないかを調べる。人体に流れる血液は多数の成分が複雑に混合しており（右下図）、病気の発症等に伴う成分変化によって粘度が増加することが知られている。一方で、血漿は血球の濃度とは独立した粘度変化を示し、病気との関連は未解明である。そのため、血漿粘度の変化を追跡することは病気のリスクを知る観点から重要であると考えられる。しかし、従来の血液粘度測定では、本当は不均一な混合物である血液を均一な連続体と見なした「バルク粘度」で評価しており、血液の液体部分（血漿）の「局所粘度」に関する情報は得られない。回転型蛍光分子プローブを用いて血漿粘度を定量した報告は1報のみであり（Haidekker et al. *Am. J. Physiol.: Heart Circ. Physiol.* **2002**, 282, 1609.）、わざわざ遠心分離によって血液から血球を排除して血漿成分を単離したのちに評価している。本提案では、血漿中タンパク質にも吸着しない「羽ばたく蛍光粘度プローブ」を、空間分解能の高い顕微鏡と組み合わせて用いることで、血液の不均一性を考慮しつつ、血球を含んだままの状態ですべて「血漿部分の局所粘度」を測定することに挑戦する。

応力プローブでは、FRET を活用した色素連結型プローブであれば、数 pN の力に反応できるが（Salaita et al., *Acc. Chem. Res.* **2017**, 50, 2915）、これは室温における熱揺らぎ ($k_B T$) に比するエネルギー範囲であり、高分子変形時に高分子鎖にかかる力の範囲 10–100 pN とはマッチしない（右図）。一方で、結合切断型メカノフォアの活性化には一般に数 nN の力が必要となり（Robb et al., *JACS*, **2020**, 142, 16364）、高分子の破壊が伴ってしまう。高分子の可逆的変形において分子鎖にかかる力（およそ 10–100 pN）に可逆的に対応する蛍光レシオ型プローブは報告されていなかった。我々は、結合切断を伴わない柔軟な蛍光レシオ Force probe として、アントラセン FLAP がおよそ 100 pN の閾値で蛍光波長を可逆的にスイッチすることを実験と理論の両面から示した（後述論文5）。実際に FLAP をポリカーボネートの高分子鎖にドープして、予め切れ目（Notch）を入れた試験片を延伸すると、亀裂が進展して高分子鎖の切断が起こる前に、微弱な力の伝達に反応して蛍光レシオが空間的に変化する様子が観測できた（右図の中央）。そこで本計画では、生体親和性が高い PDMS 高分子に FLAP force probe を導入し、「PDMS スタンプ」と呼ばれる微細加工技術へと運用することで、柔らかな変形でも蛍光レシオが顕著に変化する機能性マイクロ流路を開発し、バイオテクノロジーの現場で活用することを目指す。



3. 研究の方法

粘度プローブと応力プローブのそれぞれについて述べる。

まず粘度プローブについて、1–10 cP の粘度範囲で明瞭な蛍光応答を示す水溶性の羽ばたく粘度プローブを新たに開発し、羽ばたく骨格の両末端に置換基として親水性の PEG（分子量 5000–20000）や正電荷をもつアンモニウムを導入した親水性 FLAP の合成法を確立した。PEG は血漿中のタンパク質であるアルブミンへの吸着を防ぎ、それだけで FLAP に導入しても粘度応答機能を阻害しないことを確認できた一方で、親水性 FLAP であっても水そのものへの溶解性は依然として低いことがわかった。これに対して、水溶性の十分に高い蛍光寿命応答型の BODIPY 蛍光粘度プローブが群馬大学の吉原利忠らによって開発され、血液粘度プローブとして機能することが報告された。そこで研究代表者は水溶性粘度プローブとしての計画を変更し、独自の粘度プローブの活用法として、ネマチック液晶の相転移における局所粘度の追跡、および単一分子蛍光スペクトル解析による「ひとつの自由体積」のダイナミクスの解析を進めた。

次に応力プローブについて、架橋および非架橋ポリウレタン、非架橋ポリカーボネート、架橋 PDMS などのエラストマーに FLAP を導入して局所応力・局所歪みに関する定量かつ可逆な解析を実施した。主鎖に導入したものと架橋点に導入したものを作り分けられるため、ナノスケールの応力集中に関する知見が得られる。特に FLAP は二重発光性であるため、分子鎖のうちピンと

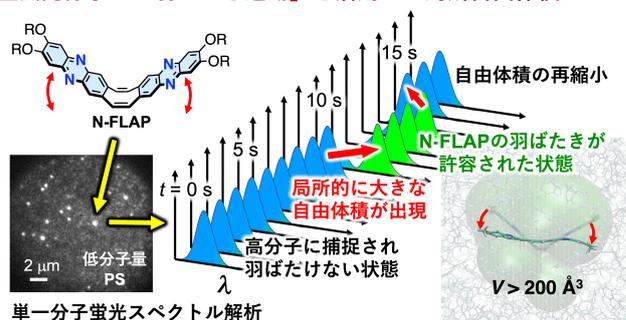
張られた状態のものが約何%であるかを蛍光レシオメトリック解析で定量的に議論できる。さらに架橋ポリアウレタンに有機溶媒を含ませてゲルを得たのち、圧縮による不均一な応力分布を追跡した。

4. 研究成果

局所の粘度と自由体積の変化を追跡できる二重発光分子の開発と励起状態エネルギー設計

アントラセンやフェナジンを翼にもつ FLAP は、光励起状態で二重発光を示し、羽ばたき運動が局所の粘度と自由体積に大きく依存する系となる。特に羽ばたき型の分子運動により、従来の結合回転型の蛍光粘度プローブ BODIPY-C₁₂ よりも低粘度領域で高感度な応答を実現できる (*Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 16430; *BCSJ* **2020**, *93*, 1102)。これを利用すると、局所の自由体積環境に応じて分子運動が許容/抑制されるため、1分子分光法で高分子の自由体積が時々刻々と膨張収縮を繰り返す挙動の追跡に成功した (右図; *JACS* **2021**, *143*, 14306)。また、代表的なネマチック液晶である 5CB のネマチック-等方相転移における局所粘度の変化について、従来の BODIPY 系粘度プローブでは検出できなかった一方で、蛍光レシオ型の FLAP を用いれば検出できることを示した (*Chem. Commun.*, **2022**, *58*, 2128-2131)。

二重発光分子の「羽ばたき運動」を活用した局所自由体積プローブ



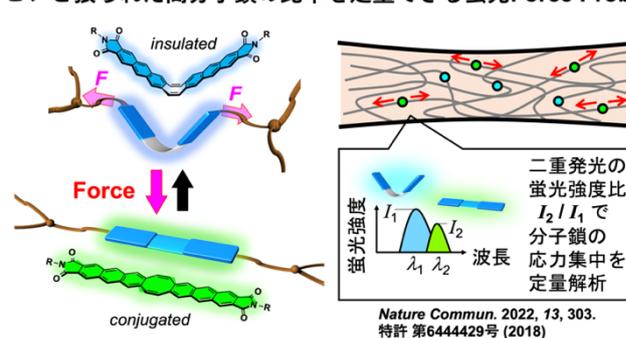
J. Am. Chem. Soc. **2021**, *143*, 14306.

ピンと張られた分子鎖を定量できる蛍光レシオ型フォースプローブの開発とナノ力学計測への展開

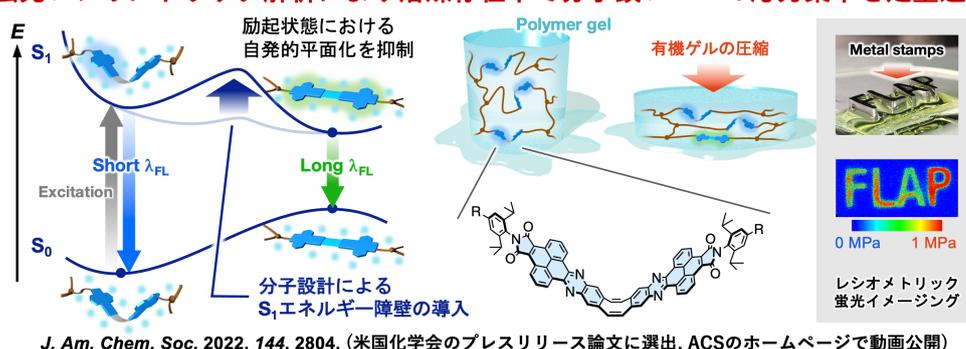
分子鎖に伝わる微弱な力を定量する手法として、AFM や光/磁気ピンセットなどの物理的手法があるが、これらの手法は、1本の高分子鎖など、理想環境の分析に用いることはできても、材料や細胞の内部といった複雑な凝集系において伝わる力をありのままの形態で評価することはできない。一方で、力に応答する蛍光分子をプローブとして用いる化学的手法は、分子に伝わる力の情報を蛍光に反映することから、材料とバイオの両分野で用いられている。

本研究では、FLAP が高分子物理の研究に最適な、100 pN に応答閾値をもつ理想的な蛍光レシオメトリック型の Force Probe として機能することを示した (右図; *Nat. Commun.* **2022**, *13*, 303; 京都大学からプレスリリース)。さらに、FLAP の導入する箇所を合成段階で制御することで、破断前の高分子網目において架橋点では 10-15% の分子鎖がピンと張られ、破壊の起点となりやすいことを示した。また、FLAP の励起状態エネルギープロフィールを分子設計で制御することで、溶媒環境でも使える Force Probe を開発し、高分子ゲルの物理に関する新しい知見を積み上げている (下図; *JACS* **2022**, *144*, 2804; 米国化学会 ACS からプレスリリースに選定され、ACS の YouTube アカウントにて動画公開)。最新の成果では、FLAP 蛍光プローブを用いて「高分子鎖の張り」と高分子材料の強靱化に寄与する「歪み誘起結晶化 (SIC)」という 2つの重要な現象を 1回の試験でそれぞれ定量的に追跡し、それらの現象が同時ではなく段階的に起こることや、SIC の発生時点で約 70% の高分子鎖がピンと張られていることなどを明らかにし、それまで未知だったソフトマター物理のフロンティアを急速に開拓している (*JACS* **2023**, *145*, 26799; 京都大学からプレスリリース)。

ピンと張られた高分子鎖の比率を定量できる蛍光Force Probe



蛍光レシオメトリック解析により溶媒存在下で分子鎖レベルの応力集中を定量追跡



さらなる成果の詳細に関しては、上記プレスリリースを参照されたい。

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 2件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Suga Kensuke, Yamakado Takuya, Saito Shohei	4. 巻 145
2. 論文標題 Dual Ratiometric Fluorescence Monitoring of Mechanical Polymer Chain Stretching and Subsequent Strain-Induced Crystallization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 26799 ~ 26809
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.3c09175	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 Kimura Ryo, Yoneda Yusuke, Kuramochi Hikaru, Saito Shohei	4. 巻 22
2. 論文標題 Environment-sensitive fluorescence of COT-fused perylene bisimide based on symmetry-breaking charge separation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Photochemical & Photobiological Sciences	6. 最初と最後の頁 2541 ~ 2552
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s43630-023-00468-4	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 Paul Sunandita, Kitakado Hidetsugu, Suga Kensuke, Kotani Ryota, Dey Nilanjan, Venkatramani Ravindra, Matito Eduard, Saito Shohei, Dasgupta Jyotishman	4. 巻 11
2. 論文標題 Triplet conformation in chromophore-fused cyclooctatetraene dyes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 12243 ~ 12253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D3TC02151C	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 Kimura Ryo, Kitakado Hidetsugu, Yamakado Takuya, Yoshida Hiroyuki, Saito Shohei	4. 巻 58
2. 論文標題 Probing a microviscosity change at the nematic?isotropic liquid crystal phase transition by a ratiometric flapping fluorophore	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 2128 ~ 2131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1cc06111a	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 Kotani Ryota, Yokoyama Soichi, Nobusue Shunpei, Yamaguchi Shigehiro, Osuka Atsuhiko, Yabu Hiroshi, Saito Shohei	4. 巻 13
2. 論文標題 Bridging pico-to-nanonewtons with a ratiometric force probe for monitoring nanoscale polymer physics before damage	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-27972-y	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 Yamakado Takuya, Saito Shohei	4. 巻 144
2. 論文標題 Ratiometric Flapping Force Probe That Works in Polymer Gels	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 2804 ~ 2815
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.1c12955	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 Nishiuchi Tomohiko, Aibara Seito, Yamakado Takuya, Kimura Ryo, Saito Shohei, Sato Hiroyasu, Kubo Takashi	4. 巻 28
2. 論文標題 Sterically Frustrated Aromatic Enes with Various Colors Originating from Multiple Folded and Twisted Conformations in Crystal Polymorphs**	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemistry A European Journal	6. 最初と最後の頁 e202200286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.202200286	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 Katsumi Shiho, Tanaka Hiroyuki, Kotani Ryota, Saito Shohei, Ito Fuyuki	4. 巻 22
2. 論文標題 Flapping motion as a fluorescent probe for assembly process involving highly viscous liquid-like cluster intermediates during evaporative crystallization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Photochemical & Photobiological Sciences	6. 最初と最後の頁 371 ~ 378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s43630-022-00321-0	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 Nishiuchi Tomohiko、Takeuchi Shino、Makihara Yuta、Kimura Ryo、Saito Shohei、Sato Hiroyasu、Kubo Takashi	4. 巻 95
2. 論文標題 Synthesis, Properties, and Intermolecular Interactions in the Solid States of -Congested X-Shaped 1,2,4,5-Tetra(9-anthryl)benzenes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1591 ~ 1599
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20220257	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 Sun Kewei、Silveira Orlando J.、Saito Shohei、Sagisaka Keisuke、Yamaguchi Shigehiro、Foster Adam S.、Kawai Shigeki	4. 巻 16
2. 論文標題 Manipulation of Spin Polarization in Boron-Substituted Graphene Nanoribbons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 11244 ~ 11250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.2c04563	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 Suga Kensuke、Yamakado Takuya、Saito Shohei	4. 巻 94
2. 論文標題 Nitrogen-Substitution in the Flapping Wings of Cyclooctatetraene-Fused Molecules	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 1999 ~ 2002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20210164	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 Goto Yuma、Omagari Shun、Sato Ryuma、Yamakado Takuya、Achiwa Ryo、Dey Nilanjan、Suga Kensuke、Vacha Martin、Saito Shohei	4. 巻 143
2. 論文標題 Dynamic Polymer Free Volume Monitored by Single-Molecule Spectroscopy of a Dual Fluorescent Flapping Dopant	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 14306 ~ 14313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.1c06428	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 Kawai Shigeki, Ishikawa Atsushi, Ishida Shin ichiro, Yamakado Takuya, Ma Yujing, Sun Kewei, Tateyama Yoshitaka, Pawlak R?my, Meyer Ernst, Saito Shohei, Osuka Atsuhiro	4. 巻 61
2. 論文標題 On Surface Synthesis of Porphyrin Complex Multi Block Co Oligomers by Defluorinative Coupling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 e202114697
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202114697	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 山本和佳、栗山怜子、北鹿渡秀嗣、齊藤尚平、巽和也、中部主敬	4. 巻 40
2. 論文標題 力に応答する蛍光分子の流体中の伸長応力に対するスペクトル変化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本流体力学会 学会誌「ながれ」	6. 最初と最後の頁 378-381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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76件 (うち招待講演 19件 / うち国際学会 28件)

1. 発表者名 Kensuke SUGA, Shohei SAITO
2. 発表標題 Controlling dual emission properties of the flapping molecules by electronic tuning
3. 学会等名 日本化学会 第104春季年会 (2024)
4. 発表年 2023年 - 2024年

1. 発表者名 Kota ONO, Kensuke SUGA, Katsuki MIYOKAWA, Shohei SAITO
2. 発表標題 Development of a liquid crystalline pressure-sensitive adhesive
3. 学会等名 第72回高分子討論会 (2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yukhe LING, Hidetsugu KITAKADO, Reo MASUDA, Shohei SAITO
2. 発表標題 Supramolecular gels that exhibit a reversible melting/gelation behavior by turning UV light on/off
3. 学会等名 第72回高分子討論会 (2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 秋友祥香・山角拓也・北鹿渡秀嗣・須賀健介・齊藤尚平
2. 発表標題 ゲルにも運用可能な蛍光 Force Probe を用いたポリウレタンにおける局所応力集中解析
3. 学会等名 第72回高分子討論会 (2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hidetsugu KITAKADO, Shohei SAITO
2. 発表標題 Reversible Photomelting of pi-Stacked Physical Crosslink in PDMS Gels
3. 学会等名 The 13th SPSJ International Polymer Conference (IPC 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 下田大夢・DEY Nilanjan・安藤北斗・木村 僚・齊藤尚平
2. 発表標題 グルタチオンとの反応を利用した蛍光レシオ粘度プローブの合成
3. 学会等名 第17回バイオ関連化学シンポジウム (2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齊藤尚平
2. 発表標題 応力や粘度に応答する光機能分子FLAP
3. 学会等名 第33回基礎有機化学討論会 (2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大野 滉太・須賀 健介・御代川 克輝・原 光生・齊藤 尚平
2. 発表標題 室温で機能する液晶粘着材料の開発
3. 学会等名 2023年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kensuke SUGA, Takuya YAMAKADO, Shohei SAITO
2. 発表標題 Dual-emissive force probe for simultaneous monitoring of polymer chain stretching and strain-induced crystallization by ratiometric fluorescence imaging
3. 学会等名 10th International Symposium On Photochromism (ISOP 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shohei SAITO
2. 発表標題 Development of a liquid crystalline pressure-sensitive adhesive
3. 学会等名 SPIE Photonics West, Emerging Liquid Crystal Technologies XIX (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 齊藤尚平
2. 発表標題 光で剥がせる接着材料と力が見える発光材料
3. 学会等名 日本オプトメカトロニクス協会 (JOEM) 第2回光部品生産技術部会Web講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齊藤尚平
2. 発表標題 蛍光Force Probeによる高分子鎖のナノ応力集中の定量と新しい液晶接着材料の開発
3. 学会等名 高分子同友会 勉強会「E 新材料の創製(反応、合成、バイオ、触媒、解析、機能等)について勉強する会」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shohei SAITO
2. 発表標題 Molecular Force Probe for Monitoring 100 pN Polymer Physics
3. 学会等名 CEMS Topical Meeting on Chemistry of π -Conjugated Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福田 紗夕・北鹿渡 秀嗣・山角 拓也・寺山 慧・隅田 真人・齊藤 尚平
2. 発表標題 オキセピン環の骨格柔軟性に着目した環境応答型蛍光プローブの設計と合成
3. 学会等名 2023年光化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryo KIMURA, Yusuke YONEDA, Hikaru KURAMOCHI, Shohei SAITO
2. 発表標題 COT-fused perylenebisimides: Symmetry breaking charge separation (SB-CS) and intramolecular charge transfer (ICT)
3. 学会等名 2023年光化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齊藤尚平
2. 発表標題 柔軟な人工分子の動きに基づく「力の可視化」と「かたさの制御」
3. 学会等名 The 4th Molecular Engine Workshop
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齊藤尚平
2. 発表標題 羽ばたく分子系 FLAP をもちいた 動くソフトマテリアルの定量解析と物性操作
3. 学会等名 第2回 動く・流れるソフトマテリアル研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齊藤尚平
2. 発表標題 応力や粘度に応答する光機能分子 『FLAP』 その特性と活用法
3. 学会等名 nano tech 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 須賀 健介・山角 拓也・齊藤 尚平
2. 発表標題 外部応力により可逆的な二段階の蛍光色変化を示すセグメント化ポリウレタンの開発
3. 学会等名 第71回高分子討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kensuke Suga, Takuya Yamakado, Shohei Saito
2. 発表標題 Two-Step Color Change of a Fluorescent Force Probe in Stretched Polymer Films
3. 学会等名 2022年光化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 須賀 健介・齊藤 尚平
2. 発表標題 蛍光Force Probeを導入したエラストマーの延伸による2段階の蛍光応答
3. 学会等名 第70回レオロジー討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kensuke Suga, Mitsuo Hara, Takuya Yamakado, Shohei Saito
2. 発表標題 Fluorescent probe showing a two-step spectral change in response to polymer chain tension and strain-induced crystallization
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 須賀 健介・齊藤 尚平
2. 発表標題 蛍光Force Probeを導入したエラストマーの延伸による2段階の蛍光応答
3. 学会等名 分子研研究会「生体分子材料を探る：発動分子のさらなる理解と設計に向けて」
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 下田大夢・木村 僚・DEY Nilanjan・齊藤尚平
2. 発表標題 Hydrophilic flapping molecules towards intracellular synthesis of viscosity probe
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 福田 紗夕・北鹿渡 秀嗣・山角 拓也・齊藤 尚平
2. 発表標題 キサンテン骨格を組み込んだ羽ばたく蛍光分子FLAPの合成
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 大野 滉太・須賀 健介・御代川 克輝・齊藤 尚平
2. 発表標題 電子不足な含窒素 共役系を両翼にもつV字型分子の合成とカラムナー液晶材料への展開
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Ryo Kimura, Shohei Saito
2. 発表標題 Aggregation of fluorescent flapping perylenebisimides
3. 学会等名 PhotoIUPAC Amsterdam 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村 僚・北鹿渡秀嗣・山角拓也・吉田浩之・齊藤尚平
2. 発表標題 ネマチック液晶に分散させた蛍光粘度プローブの挙動解析
3. 学会等名 ナノ力学研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村 僚・齊藤尚平
2. 発表標題 刺激応答高密度共役システムを志向したV字型ペリレンビスイミド二量体の開発と会合挙動の解析
3. 学会等名 第6回高密度共役若手会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村 僚・齊藤尚平
2. 発表標題 高密度共役システムを志向したV字型ペリレンビスイミド二量体の刺激応答解析
3. 学会等名 第7回高密度共役若手会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村 僚・齊藤尚平
2. 発表標題 V字型ペリレンビスイミド二量体の会合と刺激応答
3. 学会等名 光化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋友祥香・山角拓也・北鹿渡秀嗣・木村 僚・齊藤尚平
2. 発表標題 流体の伸長応力イメージングを志向した蛍光Force Probeの開発
3. 学会等名 第71回高分子討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋友祥香・山角拓也・北鹿渡秀嗣・木村 僚・栗山怜子・巽 和也・中部主敬・齊藤尚平
2. 発表標題 流体応力場のリアルタイムイメージングを志向した蛍光Force Probeの分子設計と合成
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会(2022)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 北鹿渡秀嗣・増田怜旺・齊藤尚平
2. 発表標題 多重 スタッキング構造を導入したシリコーンの自立膜および超分子ゲル
3. 学会等名 第71回高分子討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋隼人・山角拓也・須賀健介・DEY Nilanjan・齊藤尚平
2. 発表標題 金属配位が関与する超分子重合の遅延時間の制御
3. 学会等名 第71回高分子討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoaki Konishi, Yumi Nakaike, Mitsuo Hara, Ryuma Sato, Yuri Saida, Wataru Yajima, Ryo Shikata, Masaki Hada, Shohei Saito
2. 発表標題 Molecular liquid crystal adhesive that melts by light: Mechanism elucidation of the photomelting function
3. 学会等名 19th Optics of Liquid Crystals (OLC2021) サテライトワークショップ (SWS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuri Saida, Tomoaki Konishi, Yumi Nakaike, Wataru Yajima, Ryo Shikata, Mitsuo Hara, Shohei Saito, Masaki Hada
2. 発表標題 Ultrafast time-resolved electron diffraction with double-pulse-excitation applied to the light-melt adhesive based on a flapping triphenylene liquid crystal
3. 学会等名 19th Optics of Liquid Crystals (OLC2021) サテライトワークショップ (SWS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山角 拓也, 齊藤 尚平
2. 発表標題 高分子ゲル中で機能する羽ばたくForceプローブ分子の開発
3. 学会等名 ナノ力学研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齊藤 尚平
2. 発表標題 ナノレベルの分子骨格の動きを活かした新しい科学技術の創出
3. 学会等名 ナノ力学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shohei Saito
2. 発表標題 Baird aromatic supramolecular adhesive
3. 学会等名 International Conference on Excited-State Aromaticity and Antiaromaticity (ICESAA-2) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shohei Saito
2. 発表標題 A Molecular Force Probe for Bridging pico-to-nanoNewton Physics
3. 学会等名 Singapore International Chemistry Conference (SICC-11) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shohei Saito
2. 発表標題 Fluorescent Viscosity Probe and Force Probe for Soft Materials
3. 学会等名 19th Optics of Liquid Crystals (OLC2021) サテライトワークショップ (SWS2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shohei Saito
2. 発表標題 Flapping Molecular Probe (FLAP) for Monitoring Polymer Mechanochemistry before Covalent Bond Scission
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Aggregation-Induced Emission (AIE-5) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shohei Saito
2. 発表標題 Flapping fluorophores for new polymer physics and functional supramolecules
3. 学会等名 The 5th International Union of Materials Research Societies International Conference of Young Researchers on Advanced Materials IUMRS-ICYRAM2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shohei Saito
2. 発表標題 Molecular Force Probe for Monitoring 100 pN Polymer Physics
3. 学会等名 PhotoIUPAC Amsterdam 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shohei Saito
2. 発表標題 Flapping molecules (FLAP) for photo- and mechanoresponsive materials
3. 学会等名 Molecular Rotors, Motors, and Switches 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kensuke Suga, Takuya Yamakado, Shohei Saito
2. 発表標題 Two-Step Fluorescence Color Change of a Force Probe in Stretched Elastomers
3. 学会等名 PhotoIUPAC Amsterdam 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Yamakado, S. Saito
2. 発表標題 Rationenric Fluorescent Force Probe That Works in Organogels
3. 学会等名 19th Optics of Liquid Crystal Conference (2022), Japan (online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Kimura, Hidetsugu Kitakado, Takuya Yamakado, Hiroyuki Yoshida, Shohei Saito
2. 発表標題 Viscosity probing function of flapping fluorophores and optical properties in a nematic liquid crystal
3. 学会等名 19th Optics of Liquid Crystal Conference (2022), Japan (online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋隼人、山角拓也、須賀健介、DEY Nilanjan、齊藤尚平
2. 発表標題 長時間にわたる多段階蛍光変化を伴う金属配位型分子集積
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村 僚, 北鹿渡秀嗣, 山角拓也, 吉田浩之, 齊藤尚平
2. 発表標題 ネマチック液晶に分散させた蛍光粘度プローブの挙動解析
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)、オンライン
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋友祥香, 山角拓也, 北鹿渡秀嗣, 木村僚, 齊藤尚平
2. 発表標題 流体の伸長応力イメージングを志向した蛍光Force Probeの開発
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)、オンライン
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本和佳, 栗山怜子, 北鹿渡秀嗣, 齊藤尚平, 巽和也, 中部主敬
2. 発表標題 力に応答する蛍光分子の流体中の伸長応力に対するスペクトル変化
3. 学会等名 日本流体力学会年会(2021)、オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hidetsugu Kitakado, Shohei Saito
2. 発表標題 Mechanoresponsive PDMS that Reversibly Changes Fluorescence in Sub-MPa Stress
3. 学会等名 第70回高分子討論会(2021)、オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hidetsugu Kitakado, Shohei Saito
2. 発表標題 Mechanoresponsive PDMS that Reversibly Changes Fluorescence in Sub-MPa Stress
3. 学会等名 19th Optics of Liquid Crystal Conference (2022), Japan (online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sunandita Paul, Mitradip Das, Ryota Kotani, Nilanjan Dey, Hidetsugu Kitakado, Ravindra Venkatramani, Shohei Saito, Jyotishman Dasgupta
2. 発表標題 Excited State Planarization in_Chromophore-Fused Cyclooctatetraene Dyes
3. 学会等名 11th Asian Photochemistry Conference (2021), online (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Reiko Kuriyama, Waka Yamamoto, Hidetsugu Kitakado, Shohei Saito, Kazuya Tatsumi, Kazuyoshi Nakabe
2. 発表標題 Spectral change of stress-responsive fluorescent molecule caused by the hydrodynamic stress field of microchannel flow
3. 学会等名 ESCHM- ISCH- ISB2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村 僚, 齊藤尚平
2. 発表標題 縮環様式が異なる羽ばたくペリレンビスイミドの光物性と集積様式の比較
3. 学会等名 第31回基礎有機化学討論会, 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kensuke Suga, Takuya Yamakado, Shohei Saito
2. 発表標題 Two-step fluorescence color change of stress-responsive polyurethanes that incorporate a flapping molecule
3. 学会等名 19th Optics of Liquid Crystal Conference (2022), Japan (online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須賀 健介, 山角 拓也, 齊藤 尚平
2. 発表標題 蛍光プローブを組み込んだポリウレタンの延伸による二段階蛍光変化
3. 学会等名 第70回高分子討論会(2021)、オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須賀 健介, 内田 幸明, 鍛冶 静雄, 齊藤 尚平
2. 発表標題 相転移挙動の予測と制御に向けたインシリコ液晶ライブラリの構築
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)、オンライン
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 御代川 克輝, 須賀 健介, 本多 翔, 原 光生, 齊藤 尚平
2. 発表標題 Polymorph Predictorを用いた羽ばたく分子の結晶パッキング構造予測
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会(2022)、オンライン
4. 発表年 2022年

1. 発表者名	Tomoaki Konishi, Yuri Saida, Wataru Yajima, Ryo Shikata, Masaki Hada, Yuushi Shimoda, Kiyoshi Miyata, Yusuke Yoneda, Hikaru Kuramochi, Yumi Nakaike, Mitsuo Hara, Ryuma Sato, Takuya Yamakado, Ryota Kotani, Shohei Saito
2. 発表標題	Real-time control of liquid crystalline adhesive by turning ultraviolet light on and off
3. 学会等名	2021年光化学討論会 (2021)、オンライン
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Tomoaki Konishi, Yumi Nakaike, Mitsuo Hara, Ryuma Sato, Yuri Saida, Wataru Yajima, Ryo Shikata, Masaki Hada, Shohei Saito
2. 発表標題	Molecular liquid crystal adhesive that melts by light: Mechanism elucidation of the photomelting function
3. 学会等名	19th Optics of Liquid Crystal Conference (2022), Japan (online) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Yuri Saida, Tomoaki Konishi, Ryuma Sato, Yumi Nakaike, Wataru Yajima, Ryo Shikata, Mitsuo Hara, Shohei Saito, Masaki Hada
2. 発表標題	Ultrafast time-resolved electron diffraction with double-pulse-excitation applied to the light-melt adhesive based on a flapping triphenylene liquid crystal
3. 学会等名	19th Optics of Liquid Crystal Conference (2022), Japan (online) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	小西智暉, 原光雄, 齊藤尚平
2. 発表標題	非水素結合性の相互作用によって高い接着力を示す超分子接着材料の開発
3. 学会等名	日本化学会第102春季年会(2022)、オンライン
4. 発表年	2022年

1. 発表者名 齊藤 尚平
2. 発表標題 Flapping molecules for functional probe and materials
3. 学会等名 Spring semester, Department of Chemistry Colloquium (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤 尚平
2. 発表標題 羽ばたく分子群FLAPの異分野融合研究
3. 学会等名 第89回講演会 有機化学研究会 白鷺セミナー (オンライン) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤 尚平
2. 発表標題 Light-melt adhesives: Structural design and adhesive performances
3. 学会等名 Optics of Liquid Crystals 2021 (OLC2021) (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤 尚平
2. 発表標題 光で剥がせるライトメルト接着材料の開発
3. 学会等名 接着・接合技術コンソーシアム 第14回企業ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤 尚平
2. 発表標題 Molecular force probe for polymer physics before structural damage
3. 学会等名 Pacifichem 2021 Congress (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤 尚平
2. 発表標題 Flexible Mechanophore Activated in Crystals
3. 学会等名 Pacifichem 2021 Congress (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤 尚平
2. 発表標題 Bridging pico-to-nanoNewton: Ratiometric Force Probe for Nanoscale Polymer Physics Before Damage
3. 学会等名 Pacifichem 2021 Congress (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村 僚, 北鹿渡秀嗣, 山角拓也, 吉田浩之, 齊藤尚平
2. 発表標題 ネマチック液晶に分散させた蛍光粘度プローブの挙動解析
3. 学会等名 ナノ力学研究会(2022)、沖縄
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山角 拓也, 齊藤 尚平
2. 発表標題 高分子ゲル中で機能する羽ばたくForceプローブ分子の開発
3. 学会等名 ナノ力学研究会(2022)、沖縄
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齊藤 尚平
2. 発表標題 ナノレベルの分子骨格の動きを活かした新しい科学技術の創出
3. 学会等名 ナノ力学研究会(2022)、沖縄
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Shohei SAITO Homepage https://shohei-saito.webnode.jp/ 本研究の成果が高く評価され、2024年4月1日から大阪大学大学院理学研究科化学専攻の教授に着任した。
--

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
研究分担者	佐藤 良勝 (SATO Yoshikatsu) (30414014)	名古屋大学・トランスフォーマティブ生命分子研究所・特任准教授 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	倉持 光 (KURAMOCHI Hikaru)		
研究協力者	米田 勇祐 (YONEDA Yusuke)		
研究協力者	ダスグプタ ジョティシュマン (Dasgupta Jyotishman)		
研究協力者	ポール スナンディタ (Paul Sunandita)		
研究協力者	バツハ マーティン (VACHA Martin)		
研究協力者	大曲 駿 (Omagari Shun)		
研究協力者	藪 浩 (YABU Hiroshi)		

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
---------	---------