

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02794

研究課題名(和文) その場構造解析とダイナミクス制御で実現する硬質ポリロタキサン材料の機能創成

研究課題名(英文) Functionalization of hard polyrotaxane materials facilitated by in-situ structural analysis and control of the dynamics

研究代表者

加藤 和明 (Kato, Kazuaki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：80570069

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：環状分子と直鎖状高分子から成るポリロタキサンガラスについて、ガス分離膜と接着という機能に着目した基礎的研究を行った。溶媒キャストに適したポリロタキサンを合成して薄膜化することで、バルジ試験による加圧を行っても脆性的に破裂を起こさないタフな自立薄膜を得ることに成功し、窒素に対して30倍程度の非常に高い二酸化炭素透過性を達成した。また、金属基板との界面で埋もれた高分子接着剤の構造を荷重下で解析する手法を構築し、実際に接着力によって異なるひずみ分布やひずみの非局在化が観測された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

接着剤やガス分離膜として現在使用されている既存の高分子材料とは分子構造が異なり、環状分子と直鎖状高分子が幾何学的に連結してできたネックレス状のポリロタキサンから成る材料「ポリロタキサンガラス」には様々な特異な物性が知られている。例えば、既存の高分子ガラスにはない非常に高い高分子の運動性は気体分子等の物質透過性に影響すると考えられ、高い延性は界面に拘束された接着剤の状態でも発揮されることが期待できる。本研究では、これらの機能材料への展開の基盤となる成形法や構造解析法を確立したことで、既存の高分子材料とは異なる材料設計が可能になることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We performed fundamental researches on polyrotaxane glasses, which are necklace-like molecules composed of cyclic molecules and threading polymers, focusing on functions of gas separation and adhesion. We synthesized a series of polyrotaxane derivatives that were very soluble in organic solvents to enable a solvent casting. As a result, we obtained mechanically tough thin film that exhibited ductile fracture under a bulge test. The obtained membranes showed approximately 30 times higher gas permeability of carbon dioxide compared to nitrogen. Besides, we built a new method to analyze structures of buried polymer adhesives in the interface of metal substrates. This method revealed different strain distributions depending on the adhesion strengths and a strain-delocalization process.

研究分野：高分子材料化学

キーワード：ロタキサン ポリロタキサンガラス 薄膜 気体分離膜 界面 接着 X線散乱

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ポリロタキサンは主鎖となる高分子と複数の環状分子から成るネックス状の超分子であり(図1) 高分子鎖上を環状成分がスライドあるいは回転できる性質(環動性と呼ぶ)に由来する様々な特異な力学物性や機能が、溶液中やゲル、エラストマー中では多数報告されている。一方、高分子の運動性が劇的に低下するガラス転移温度以下では、環動性は失われると考えられ、実際にこれまでのポリロタキサン固体材料では、ロタキサン構造に由来する特異な力学物性は一切報告されていなかった。しかし我々は、各成分間の相互作用や包接率(環状成分が主鎖高分子を覆う割合)を制御することでポリロタキサンの熔融成型とガラス化を可能にし、ロタキサン構造でのみ実現可能な様々なダイナミクスや変形応答を示す新材料「ポリロタキサンガラス」の創製に成功した(*J. Phys. Chem. Lett.* **2015**, *6*, 4043.)。既存の高分子では、ガラス化に伴い主鎖の運動はほぼ凍結して側鎖の局所運動が残るのが一般的だが、ポリロタキサンガラスでは重量の大部分を占める環状成分の運動は凍結していても、主鎖-側鎖間の化学結合が無いため、主鎖がその中で自由に運動している(図2)。ポリロタキサンガラスは一般的な高分子樹脂と同程度のヤング率(1~2 GPa)でも400%以上もの延伸が可能であるが、ネッキングを起こす応力集中部位で特異的な伸長誘起相分離と主鎖高分子の結晶化が起こることや(*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, *9*, 32436.) 異成分間の幾何学的拘束がガラス転移ダイナミクスに与える非常に強い影響を及ぼすこと(*J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 12502.) が明らかになり、既存の高分子樹脂材料とは異なる物性が多数示されてきた。さらに最近の研究を通して、ポリロタキサンガラスがX線散乱による詳細な構造解析に非常に適した材料であることも明らかになってきた。

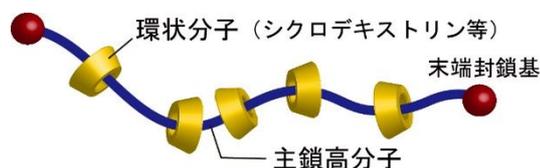


図1 ポリロタキサンの分子構造

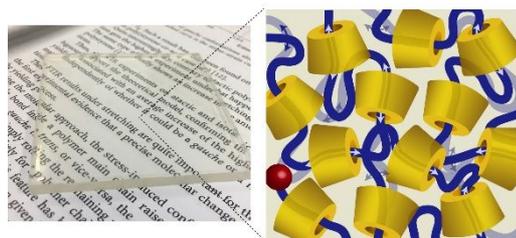


図2 ポリロタキサンガラスの構造と凍結した環状分子の中を運動する主鎖高分子。

2. 研究の目的

このようにポリロタキサンガラスを用いることで、異なる分子間が幾何学的に拘束されたいわゆるロタキサン構造が本来持っている特異なダイナミクスや刺激応答性を、ガラス状態の硬質樹脂中でも発現可能となり、既存の高分子材料には実現困難な高機能化や高強度化も可能であると考えられる。同時に、ポリロタキサンガラスの構造的特徴を活かした詳細な構造解析により、分子論的理解が発展途上にある研究分野の発展に大いに貢献できると考えられる。そこで本研究では、ポリロタキサンガラスの特異なダイナミクスを活かした分離膜や接着剤について、詳細かつ局所的なその場構造解析と界面のダイナミクス解析に基づいて、分子レベルでの気体分離機構や接着機構を明らかにすることで、既存の高分子材料では実現不可能な高い分離性能や接着機能の実現が可能な新材料の創製を目的とする。

3. 研究の方法

分離膜等の機能材料への応用に必要な、まずは薄膜化について検討する。そして得られた薄膜の気体分離性能についてはガス透過性を評価可能な装置を導入して評価し、ガス圧印加時の薄膜の構造についてはバルジ試験を用いて行う。バルジ試験は研究分担者である九州大学の小椎尾謙博士が様々な高分子薄膜で実績があるため、サンプルを九州大学に持ち込んで実験を共同で行うとともに技術を習得し、研究代表者単独でも実験ができるよう実験系の構築も行う。そして、SPring-8のBL40XUビームラインにもバルジ試験装置を持ち込んで実験することで、ガス透過時のその場構造解析を行う。こうして得られた構造データと力学データ、そしてガス透過性能を系統的に比較することで、ポリロタキサンガラス特有の現象の探索とその起源について考察する。また、異種材料との界面で特有の現象や接着性能を分子論的に理解するために、最も基礎的でありながら実現が困難な「埋もれた界面」の構造解析について、自ら設計する新たな測定系により実現を試みる。構築された構造解析手法を用いて、接着力等の異なる接着界面を複数測定し、接着界面の破壊過程について明らかにするとともに接着力との関係を明らかにする。

4. 研究成果

ポリロタキサンガラスに特有のX線回折の起源解明

ポリロタキサンガラスにはその化学構造にはほとんど依存せず、 5 nm^{-1} と 15 nm^{-1} 付近にブロードなX線回折(アモルファスハロー)を示すことが分かっていたが、特に広角側の回折については起源が全くわかっていなかった。そこでポリロタキサンガラスと、その主成分で質量の8割

以上を占める環状成分であるシクロデキストリン誘導体を用いて、それらの溶融状態および希薄溶液状態でのX線回折を SPring-8 BL05XU で行った。シクロデキストリンの水酸基を別の置換基に置き換えた誘導体の溶融状態や、溶媒を系統的に変化させた溶液状態でのX線回折を系統的に解析したところ、 5 nm^{-1} 付近のハローは高い置換基を導入するほど小角側にシフトしたことから、シクロデキストリン分子間の距離相関に由来するものであることが確かめられた。一方、 15 nm^{-1} 付近の広角側のハローの位置は置換基の構造にはほとんど依存せず、希薄溶液状態でも観測されることを初めて明らかになった。この結果は広角側のハローが分子間の距離相関ではないことを明確に示し、その相関距離が環状分子を構成する6つのグルコースを繋ぐグリコシド酸素原子間の距離と一致したことから、その原子間相関に由来していることが示唆された。この仮説はポリロタキサンガラスの延伸下でのX線回折によって証明された。すなわち図3に示すように、延伸方向に配向したポリロタキサンは、主鎖高分子の配向によってシクロデキストリンの開口面が延伸方向に配向すると考えられるが、実際に 15 nm^{-1} 付近のハローを追跡すると未変形時は等方的であった回折強度が延伸配向後は延伸に垂直な方向の回折が強められており、シクロデキストリンの開口面の垂直に選択的に回折を起こすことが実験的に示された。この成果は、硬い環状分子をプローブとして用いる新たな分析手法の基礎となり後述する接着界面の構造解析にも重要な役割を果たすものであり、学术论文 (K. Kato et al., *J. Phys. Chem. Lett.* **2020**, *11*, 6201) として成果が公開された。

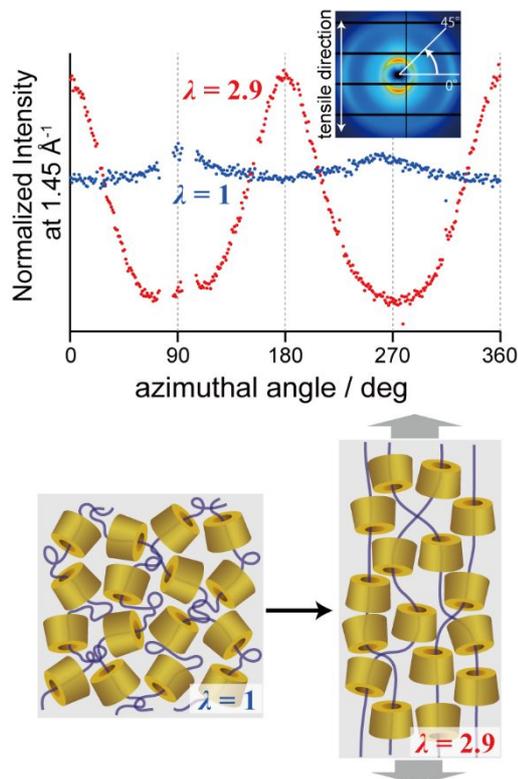


図3 ポリロタキサンガラスの未延伸状態と2.9倍延伸時における 14.5 nm^{-1} の回折強度の方位角プロット。

ポリロタキサンガラスの薄膜化とガス分離性能と加圧下構造との関係

ポリロタキサンガラスはこれまで溶融成形によって材料化されてきたが、溶解可能な溶媒は水やジメチルスルホキシドなどに制限されており、溶媒キャストによる材料化には適していなかった。そこで、ガラス転移温度は室温より十分高く熱分解温度よりも十分低く維持して溶融による成形加工性は保ちつつ、揮発性溶媒に高濃度で溶解可能なポリロタキサンの合成を試みた。その結果、環状成分であるシクロデキストリンをアシル化した誘導体でクロロホルムやアセトンへの高い溶解性が確認された。そして高濃度のアセトン溶液を調製し卓上コーターでキャスト成形したところ、直径60mm程度で $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 程度の厚みを持つ透明なガラス状薄膜を得ることに成功した(図4)。またスピコートによって厚さ $1 \mu\text{m}$ 以下の超薄膜

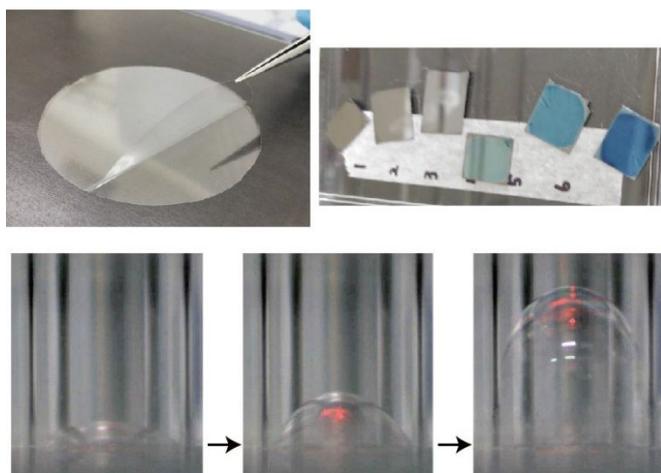


図4 溶媒キャスト法で得られたポリロタキサンガラス自立薄膜とスピコート超薄膜(上)と、バルジ試験で膨張する自立薄膜の様子(下)。

の合成にも成功し、膜厚 850 nm であってもスピコート時の基板から剥がして自立するだけでなく、その自立膜のバルジ試験によって降伏を示すタフな薄膜の調製に成功した。そして、包接率が異なる種々のアシル化ポリロタキサンを合成して厚さ $10 \mu\text{m}$ 程度の自立膜を作製し、気体分離性能については差圧式の気体透過測定装置で評価し、力学物性は乾燥窒素を用いたバルジ試験によって評価した。その結果、包接率が下がり軸高分子の割合が大きくなるにつれて、窒素に対する二酸化炭素の透過性が上昇し、30倍程度の高い気体選択性を示すことが明らかになった。一方、包接率の低下に伴いヤング率は減少してより大変形が可能にはなったが、包接率の高い膜であっても降伏を示す延性材料であることも明らかになった。解析の結果、膜への二酸化炭素の溶解性が高い選択性の起源であることも明らかとなり、他の高分子分離膜にはないガラス状態における主鎖高分子の高い運動性が気体分子との親和性向上に寄与していることが示唆さ

れた。高強度で高性能な分離膜が容易に作製できるという本成果は、分離性能だけでなく高い力学強度も同時に要求される気体分離膜の分野に新しい選択肢を提供するものであり、学術論文 (K. Kato et al., *ACS Appl. Polym. Mater.* **2021**, 3, 4177) として成果が公開された。

さらに、ポリロタキサン薄膜の気体透過プロセスの解明に向けて、バルジ試験下での偏光光度カメラを用いた同時測定を行った。その結果、既存の高分子ガラスでは見られない複雑な分子配向が、特にバルジ中心付近で見られることが明らかとなった。均質変形材料の場合、バルジ中心では薄膜が等二軸延伸を受けていると考えられるが、バルジ中心付近に見られる配向はランダムであり、多軸応力下でのポリロタキサンガラス特有の現象を捉えている可能性が示唆された。そこで、SPRing-8 BL40XU にて放射光 X 線マイクロビームを用い、バルジ中心と中心以外における X 線散乱測定から構造について比較を行った。X 線ダメージにより連続的な照射では降伏点を超える領域まで十分な測定ができなかったため断続的な照射による構造解析にとどまったが、様々な化学構造のシクロデキストリンや包接率の異なるポリロタキサンガラスの系統的な構造データの取得に成功した。この成果は偏光観察等の別の観察手法による結果と比較を行いながら、現在論文投稿に向けた準備を行っている。

ポリロタキサンガラスのダイナミクス制御指針の構築

上記の気体分離性能に加えて優れた力学物性は、共にポリロタキサンガラスが示す特異なダイナミクスが影響していることが最近の別の研究で示されてきている。このダイナミクスのうち、副分散領域に現れる主鎖高分子の運動性を制御する手法の一つとして、環状分子と主鎖高分子間の相互作用に直接働きかける分子設計の可能性について検討を行った。まず、ポリブタジエンを主鎖骨格とするポリロタキサンガラスの合成を初めて成功させ、この主鎖高分子を選択的に臭素化することで環状分子の化学構造や包接率を変え、環と主鎖の相互作用の変化を試みた。その結果、核磁気共鳴スペクトルからはシクロデキストリンの環の内側のプロトンと軸高分子の臭素原子との強い相互作用が示唆された。そして、臭素化前後のポリロタキサンガラスの物性を粘弾性測定により比較したところ、図5に示すように副分散に顕著な違いが見られた。臭素化前は、環と主鎖が相分離した状態での主鎖分子がマイクロブラウン運動していることが示された。一方、臭素化後には既存のポリロタキサンガラスと同様の副分散が見られたが、緩和強度は非常に弱かった。これは、環と軸との相互作用が臭素化により強まることによって、相分離は阻害されたものの、軸高分子の運動性も阻害された結果であるとされる。この成果は、環内部での軸高分子との相互作用により副分散とそれに伴う力学物性をも制御できることを示すものであり、この材料に特有の分子設計指針の一つが実験的に示されたものであり、学術論文 (K. Kato et al., *Chemical Communications* **2021**, 12472) として成果が公開された。

また、ガラス転移ダイナミクスの制御方法として、シクロデキストリンの環のサイズが異なる誘導体を用いて、ポリロタキサンガラスのダイナミクスについて比較を行い、環サイズが大きいほどガラス転移に由来する粘弾性緩和が速いことを明らかにした。ポリロタキサンのガラス転移では、包接率が高い場合など主鎖高分子による幾何学的な拘束が強く残っている場合には二段階の粘弾性緩和が観測されるが、環サイズが大きくなるとこの幾何学的な拘束が弱まり、結果としてガラス転移が速くなったと考えられる。この成果は、分子間相互作用だけでなく、分子間の幾何学的な拘束によってガラス転移を制御できる具体的で直感的な手法を示したもので、超分子化学の分野で培われてきた分子設計が、材料の物性制御にも有効であることを示す数少ない研究例である。この成果は、学術論文 (K. Kato et al., *Macromolecules* **2020**, 53, 8910) として公開された。

変形下における埋もれた接着界面の構造解析

接着界面で埋もれた高分子の破壊に至るまでの構造やダイナミクスの変化を観測するのは容易ではないが、接着現象の理解を進めるうえで、このような構造解析を応力印加状態で行うことは大変有益である。我々は上述したシクロデキストリン等の硬い環状分子に特有の X 線回折を用いた新たな構造解析法を用いて、金属基板に埋もれた非晶性高分子の局所ひずみと配向解析

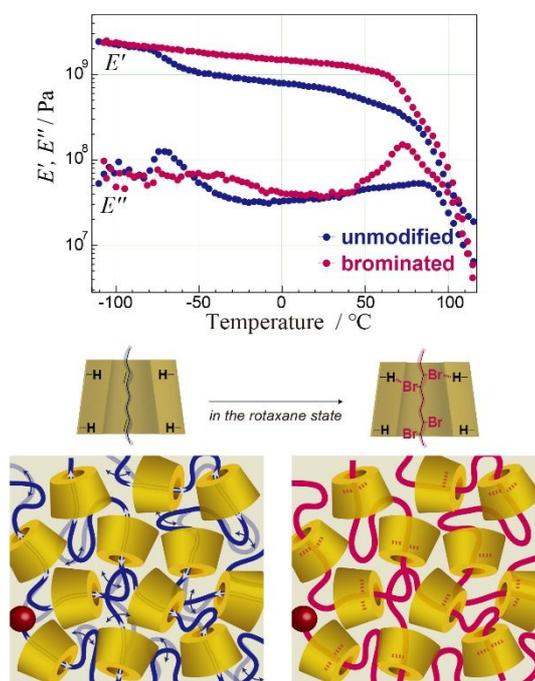


図5 主鎖高分子の臭素化により変化する粘弾性緩和挙動。主鎖と環状分子内部との強い相互作用により、副分散の起源であった主鎖の運動性が強く抑制される。

を行った。そして SPring-8 BL29XU において図 6a に示した楕円集光ミラーを用いて得られる放射光 X 線ナノビームを接着界面に透過させて測定できる測定系の構築を行った。測定用サンプルは図 6b に示すようにポリロタキサンガラスの上下をステンレス基板によってはさんで溶融させることで接着させることで得た。上部のステンレス基板には界面と垂直に延伸可能な釣り具をかけることが可能で、下部のステンレス基板は構造解析のために、またアンカー効果をできるだけ抑えるために研磨したものをを用いた。そして、上記のセットアップで得られた X 線ナノビームを界面と平行に入射し、下部基板からの高さ h を変えながらスキャンを行った。X 線散乱によって得られる典型的なプロファイルは図 6c に示すようにブロードな回折ピークが散乱ベクトル $q = 5 \text{ nm}^{-1}$ と 15 nm^{-1} 近傍に得られる。このうち、 $q = 5 \text{ nm}^{-1}$ の環状分子どうしの相関に由来するピークを基に環状分子間の平均距離を求め、引張荷重を印加しながらこの距離を追跡することで局所ひずみを得た。また接着剤には *n*-ブタノイル化体(nB)とより接着力の高い *i*-ブタノイル化体(iB)のポリロタキサンガラスを用いて比較を行った。

まず、接着力は構造解析の結果に顕著な違いが観測された。環状分子の距離相関 d_{CD} を延伸前のもの d_0 で割った局所ひずみに相当する量 ϵ_{CD} の照射位置依存性を、異なる荷重下で測定した結果を図 7 に示す。接着力は *i*B 体の方が有意に強く、マクロなひずみよりもかなり大きなひずみが、基板近傍 $h < 15 \mu\text{m}$ の領域に集中していることが明らかになった。これに対して、*n*B 体では基板近傍ではほとんど変形は見られず、むしろ基板から離れるにつれて徐々にひずみが増加し、基板から $100 \mu\text{m}$ 以上の広い領域にわたって微小なひずみが観測された。このように非常に化学構造が似た高分子であっても、金属基板との界面付近ではひずみ分布が大きく異なることが本分析手法により明らかになった。接着力が高い *i*B の界面近傍のひずみを詳しく解析したところ、界面から $7 \mu\text{m}$ 付近に最も大きなひずみの集中が見られたが、印加する荷重が大きくなるにつれてひずみが集中する領域が次第に広がっていく様子が観測された。一方、分子の配向についてはほとんど観測されなかった。バルク材料の延伸ではネッキングに伴い、相分離と分子の配向が起こるが、界面ではひずみが拘束されているためであると考えられる。こうして、ポリロタキサンガラスの主成分であるシクロデキストリン誘導体特有の X 線散乱をプローブにした新たな構造解析法を用いることで、金属基板に埋もれた接着界面の構造解析を実現し、局所ひずみの非局在化と接着力との関係を示した。この成果は、学術論文 (K. Kato et al., *The Journal of Physical Chemistry*, DOI: 10.1021/acs.jpcc.4c02362) に受理され、まもなく公開される予定である。

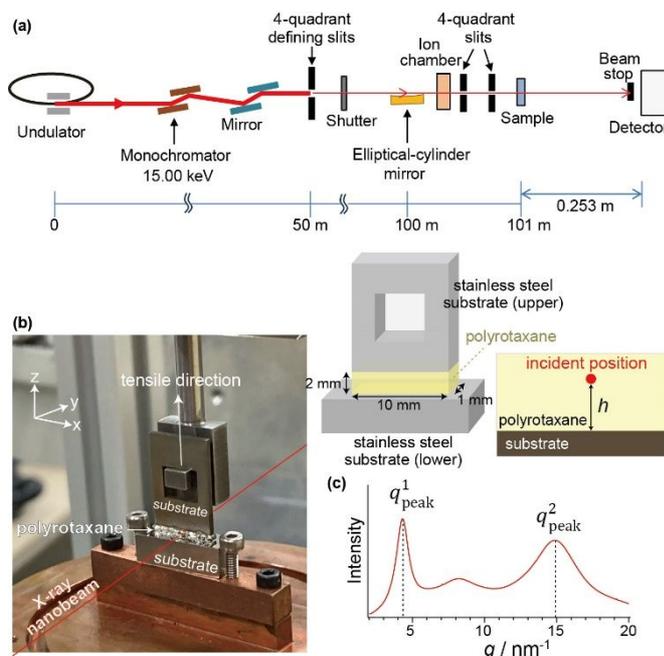


図 6 (a)接着界面の構造解析のセットアップ。楕円集光ミラーにより高さ 790 nm のナノビームを照射。(b)引張荷重下で金属基板表面からの高さ h を変えながら構造解析が可能な接着サンプルと (c) 典型的な散乱プロファイルの例。

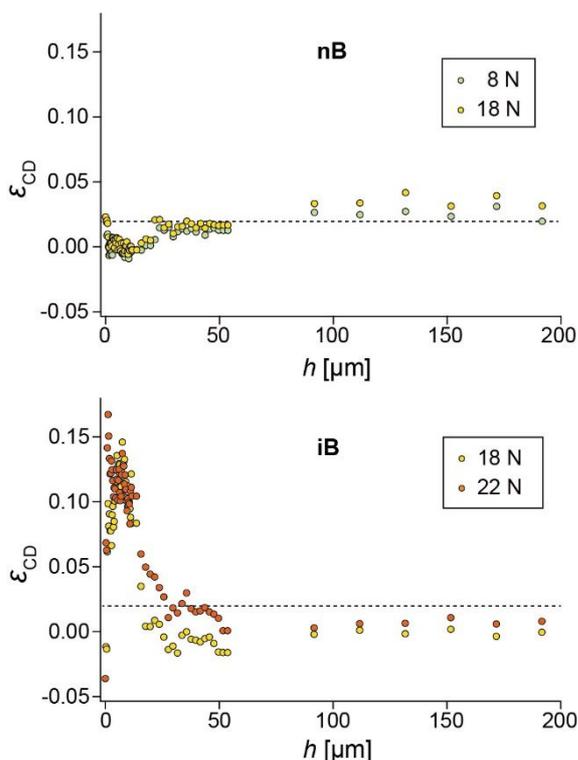


図 7 異なる荷重下での局所ひずみ ϵ_{CD} の界面からの距離 h の依存性。接着力の弱い *n*B 体と強い *i*B 体で異なるひずみ分布が観測される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kato Kazuaki, Ito Kohzo, Hoshino Taiki	4. 巻 56
2. 論文標題 Fracture Process of Mechanically Interlocked Ductile Glass Under Uniaxial Tension	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 7358 ~ 7365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.3c01368	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 Kazuaki, Taniguchi Masayuki, Ito Kohzo	4. 巻 56
2. 論文標題 Tough Glass with Mechanical Bonding Network Anchored by High-Mobility Polymers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 1810 ~ 1817
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.2c02363	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 Kazuaki, Naito Masanobu, Ito Kohzo, Takahara Atsushi, Kojio Ken	4. 巻 3
2. 論文標題 Freestanding Tough Glassy Membranes Produced by Simple Solvent Casting of Polyrotaxane Derivatives	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Polymer Materials	6. 最初と最後の頁 4177 ~ 4183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsapm.1c00622	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 Kazuaki, Mizusawa Tomoki, Ohara Akihiro, Ito Kohzo	4. 巻 57
2. 論文標題 Direct enhancement of intercomponent interactions in polyrotaxane and its pronounced effects on glass state properties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 12472 ~ 12475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1cc05516j	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 Aoyama Takuma, Kato Kazuaki, Urayama Kenji	4. 巻 11
2. 論文標題 Marked Sensitivity of Ultimate Elongation to Loading Axiality in Polyrotaxane Gels with Largely Slidable Cross Links	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Macro Letters	6. 最初と最後の頁 362 ~ 367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmacrolett.1c00801	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 Kazuaki Kat*, Kohzo Ito, Taiki Hoshino	4. 巻 11
2. 論文標題 Anisotropic Amorphous X-ray Diffraction Attributed to the Orientation of Cyclodextrin	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 6201-6205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.0c01987	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 Kazuaki Kato, Akihiro Ohara, Koji Michishio, Kohzo Ito	4. 巻 53
2. 論文標題 Effects of Ring Size on the Dynamics of Polyrotaxane Glass	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 8910-8917
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.0c02009	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 Yuzo Yamazaki, Shuuichi Nakaya, Kohzo Ito, Kazuaki Kato	4. 巻 31
2. 論文標題 Analysis of High-Molecular-Weight Polyrotaxanes by MALDI-TOF-MS Using 3-Aminoquinoline-Based Ionic Liquid Matrix	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the American Society for Mass Spectrometry	6. 最初と最後の頁 1180-1188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jasms.9b00084	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 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kazuaki Kato
2. 発表標題 Nanomechanics for Mechanically-Interlocked Glasses
3. 学会等名 3rd Material Research Meeting / The 24th IUMRS-International Conference in Asia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuaki Kato, Kohzo Ito, Taiki Hoshino
2. 発表標題 Glass of rotaxanes toughened by high-mobility mechanical bonding polymer networks
3. 学会等名 13th SPSJ International Polymer Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤和明、伊藤耕三、星野大樹
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスの変形・破壊過程の解析
3. 学会等名 第72回高分子学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤和明、伊藤耕三、星野大樹
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスの相分離誘起延性と韌性
3. 学会等名 第72回高分子討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤和明、伊藤耕三、小椎尾謙、星野大樹
2. 発表標題 機能性樹脂材料に向けたポリロタキサンの分子設計
3. 学会等名 第71回高分子学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤和明、伊藤耕三、小椎尾謙、星野大樹
2. 発表標題 制御されたインターロック構造を有するバイオベースプラスチックの物性と機能
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 加藤和明、劉謙一郎、内藤昌信、伊藤耕三、星野大樹
2. 発表標題 金属接着界面におけるポリロタキサンガラスの局所ひずみと配向解析
3. 学会等名 日本接着学会第60回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤和明、伊藤耕三、星野大樹
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスの変形挙動とクレージング
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 加藤和明、伊藤耕三、星野大樹
2. 発表標題 バイオベースプラスチックとしてのシクロデキストリンの可能性
3. 学会等名 第38回シクロデキストリンシンポジウムプログラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤 和明、伊藤耕三、星野大樹
2. 発表標題 環状分子特有のX線回折を用いた高分子材料の構造解析
3. 学会等名 第70回高分子学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤和明、劉謙一郎、竹島歩、伊藤耕三、内藤昌信、星野大樹
2. 発表標題 環状分子プローブとX線ナノビームを用いた金属-高分子接着界面の構造解析
3. 学会等名 第70回高分子討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤 和明、伊藤耕三、星野大樹
2. 発表標題 非晶性のシクロデキストリンに特有のX線回折を用いた分子配向解析
3. 学会等名 第37回シクロデキストリンシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤和明
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスの構造と物性
3. 学会等名 第69回高分子学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤和明、伊藤 耕三
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスの構造と物性と機能
3. 学会等名 第69回高分子討論会
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
研究 分担者	小椎尾 謙 (Kojio Ken) (20346935)	九州大学・先導物質化学研究所・准教授 (17102)	
研究 分担者	星野 大樹 (Hoshino Taiki) (20569173)	東北大学・国際放射光イノベーション・スマート研究センター・准教授 (11301)	

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