

令和 2 年 5 月 20 日現在

機関番号：12601
研究種目：若手研究(A)
研究期間：2016～2019
課題番号：16H06050
研究課題名(和文)高耐衝撃性とガラス転移ダイナミクスの精密設計を実現するポリロタキサンガラスの創成

研究課題名(英文)High impact resistance and controllable glass transition dynamics of polyrotaxane glass

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・講師

研究者番号：80570069
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,400,000円

研究成果の概要(和文)：高分子と環状分子が幾何学的に拘束されたポリロタキサンのみからなる新規硬質材料「ポリロタキサンガラス」について、様々な誘導体からなる材料物性の系統的な研究を行った。その結果、1)環状成分の運動が凍結したガラス状態にも残っている主鎖高分子の大運動、2)力学的タフネスを生み出す主鎖高分子と環状成分の伸長誘起相分離、3)各成分間の幾何学的拘束によるガラス転移の大幅な遅延とその分子設計による制御、4)ガラス状態における主鎖高分子の運動性と力学的タフネスとの相関が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

上記の研究成果は全て、既存の高分子材料には存在しない分子運動性や幾何学的な拘束に由来する材料物性を明らかにしたものであり、これまでとは全く異なる分子設計により材料物性が制御できることを明確に示している。このポリロタキサン特有の分子設計指針を用いることで、既存の材料の強靱化や機能化の実現も期待される。また、ポリロタキサンという構造が明確な分子を用いることで、通常の高分子材料でも見られるが観測や制御が困難な幾何学的拘束についての詳細な考察を可能とし、ガラス転移機構の解明にも資する学術的に非常に重要な研究成果となった。

研究成果の概要(英文)：Systematic study on mechanical properties and dynamics of polyrotaxane glass were carried out. Various polyrotaxane glasses were synthesized from polyrotaxane derivatives that consist of different polymers and threaded cyclic molecules with different coverages. As a result, we revealed the following characteristics in polyrotaxane glasses: 1) large motions of the threading polymers within the glassy framework formed by the cyclic components, 2) toughening mechanism associated with the stress-induced intramolecular phase-separation between different components, 3) significant prolongation of the glass transition dynamics due to the topological constraints, and 4) a correlation between the mechanical toughness and the mobility of the threading polymers in the glass state.

研究分野：高分子材料科学

キーワード：ポリロタキサン ガラス転移 シクロデキストリン 幾何学的拘束 X線散乱 ダイナミクス 強靱化
分子内相分離

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ポリロタキサンは骨格高分子と複数の環状分子から成るネックレ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)を有する。この環動性を応用した様々な機能性高分子が設計されてきたが、架橋することにより得られる環動ゲルやエラストマーといったソフトマテリアルが近年注目を浴びている。それらの物性の多くは、前駆体であるポリロタキサン溶液における環動性で決まる。我々はこれまで、高分子鎖が架橋点でスライドすることにより特異な物性を示す環動ゲルについて、その前駆体であるポリロタキサンの分子設計により力学物性の制御を行ってきた。様々な骨格高分子や環状分子から成る多様な分子構造を持ったポリロタキサンの汎用的な合成法を開発することで、環の配置エントロピーが環動ゲルの力学物性に与える効果や、環動ゲル特有の粘弾性緩和に与える環サイズ効果などを明らかにしてきた。

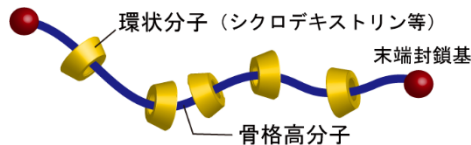


図1. ポリロタキサンの分子構造

我々は様々なポリロタキサンの誘導体について、その固体状態での分子運動性を系統的に調査する中で、従来の高分子ガラスにはない特徴的なダイナミクスを示すポリロタキサン固体(ポリロタキサンガラス、図2)の合成に成功し、2015年アメリカ化学会誌 *Journal of Physical Chemistry Letters* (Vol. 6, Page 4043) に報告した。そのガラス転移におけるダイナミクス変化は非常に緩慢で、ほぼアレニウス型の温度依存性を示す、いわゆる **strong** なガラスとして振る舞う。これは一般的に **fragile** な高分子液体がガラス転移点付近で示す協同運動効果が、このポリロタキサンにはほとんどないことを示している。また、ガラス化した後にも非常に大きな分子運動が残っていることを示す副分散が観測され、この副分散によってガラス状態の弾性率は3倍程度も変化する。これは環状成分が形成するホストフレームワーク内での高分子鎖のスライド等の比較的大きな運動が副分散の主な起源であると考えられる。このように、ポリロタキサンガラスはガラス転移や副分散を示すポリマーガラス様の振舞いをする一方で、それらのダイナミクスは一般的なポリマーガラスとは大きく異なっており、骨格高分子と環状成分の運動の独立性が、その特異性の起源であることが推測された。

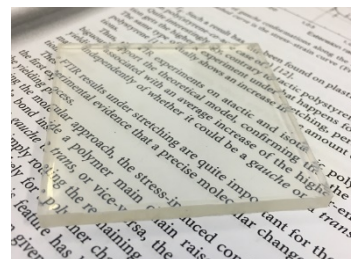


図2. 溶融成型で得られるポリロタキサン誘導体のみから成るガラス材料

2. 研究の目的

本研究は、我々が初めて合成したポリロタキサンガラスについて、その材料が示す特異なダイナミクスや力学物性について、その分子構造やインターロック構造との相関を明らかにし、異種成分間で協同的または独立した分子運動性をバルク材料中で制御するというポリロタキサン固有の分子設計指針を確立することで、既存の高分子材料とは全く異なる分子設計を基盤とする新材料の創成を目的とした。具体的には、既存のポリマーガラスでは実現不可能な高い耐衝撃性や分子設計から精密制御可能なガラス転移挙動を有する高分子材料の実現と、分子レベルでの機構解明や新規動的物性の発見などを通じて、高分子と超分子に関連する学問分野の飛躍的発展に貢献することを目的とした。

3. 研究の方法

ポリロタキサンの分子構造は、①主鎖高分子の分子構造、②環状成分の分子構造、③主鎖が環に覆われている割合(包接率)の三要素から成る。包接率は、主鎖が貫通した環で完全に覆われた状態が100%と定義される。環状成分には主にクラウンエーテル(CE)かシクロデキストリン(CD)が用いられるが、CEを有するポリロタキサン固体では、CEは主に可塑剤として働き、その中を主鎖が貫通していてもいなくても物性に顕著な差は見られない。一方で、CDを有するポリロタキサンでは、CD間の強い相互作用により、材料物性はCDにほぼ支配される。これは、高分子を包接したゼオライトと同じで、高分子とCD間の化学結合の有無にかかわらず、材料の骨格を形成するCDが物性を支配することに起因する。しかし、CD間の強い相互作用を適切な化学修飾により弱めることで結晶化を阻害し、非晶性のポリロタキサンが得られる。ただしこれだけでは不十分で、包接率の制御もポリロタキサンガラスを得るためには必要である。後述のように、包接率はガラス転移挙動に強く影響しており、包接率が高すぎると溶融成型が困難となる。逆に低すぎると、主鎖高分子の結晶化等が起こってしまう。これらの条件を満たしたポリロタキサン誘導体を溶融プレス成型することで、図1に示すような透明なガラスが得られることがわかった。

本研究で用いたポリロタキサンガラスは、主鎖高分子は主にポリエチレングリコール(PEG)、環状成分はCD誘導体から成るポリロタキサンの溶融成型または溶媒キャストで得られたものであり、材料の80wt%以上を環状成分であるCD誘導体が占めている。上記①②③の異なる様々なポリロタキサン誘導体を合成し、得られるポリロタキサンガラスの構造や物性を以下の方法で調査した。対照実験のために、主鎖高分子を含まない、100%CD誘導体から得られる「CDガラス」も比較のため合成して用いた。フィルム状サンプルを一軸延伸しながら放射光X線散乱

を測定し、変形下におけるポリロタキサンの構造解析を行うことで、ポリロタキサン特有の強靭化メカニズムについての知見を得た。また、系統的な粘弾性および誘電緩和測定に加えて中性子準弾性散乱を用いたダイナミクス測定により、強靭化に必要ないくつかの分子設計指針が得られるとともに、通常分子間相互作用とは異なる幾何学的な拘束の効果に関する知見を得た。

4. 研究成果

(1) ガラス状態における主鎖の運動性

通常の高分子はガラス転移温度以下になると、セグメント運動が凍結するため主鎖の運動性はほぼなくなり、側鎖の回転などによる局所的な運動のみが許されるガラス状態となる。しかし、ポリロタキサンガラスには主鎖の大きな運動が検出される。図 3a に、2-メトキシエチル化 α -CD と PEG から成る包接率 25% のポリロタキサンガラスの、動的粘弾性測定の結果を示す。比較のため、図 3b には環状成分である 2-メトキシエチル化 α -CD のみからなる CD ガラスの結果も示している。材料のわずか 18wt% を占める主鎖高分子が存在することで、20°C 付近のガラス転移は非常に緩慢になり、-40°C 以下で顕著な粘弾性緩和が見られるようになった。後者の T_g 以下で見られる粘弾性緩和は副分散と呼ばれ、一般的にガラス状態における側鎖の運動など、局所的な分子運動に起因している。そして、副分散の強度は、高分子ガラス材料の耐衝撃性と相関があることが知られている。ポリロタキサンガラスでは、ガラス転移を経て 0°C 付近で完全にガラス化することで貯蔵弾性率 E' はほぼ一定になるが、さらに冷却すると E' は上昇を始め、この副分散を経て -100°C までに E' が 3 倍程度にまで上昇する。この副分散強度は、大きな副分散を示し耐衝撃性に優れることで知られるアクリル樹脂 (PMMA) やポリカーボネートよりも強く、耐衝撃材料としての応用が期待できる。実際に、類似のポリロタキサン誘導体をポリ乳酸に少量添加することにより、材料の剛性をほとんど犠牲にすることなく耐衝撃性を飛躍的に向上することに成功している。一方 CD ガラスでは、メトキシエチル基の回転運動に起因する非常に弱い副分散が見られるのみである。この結果は、ポリロタキサンガラスの大きな副分散が、主鎖である PEG の運動に由来することを明確に示している。ポリロタキサンの“側鎖”とも言うべき環状成分は、材料の 80% 以上を占め、ガラス転移により拡散できなくなる。しかし“側鎖”の運動が凍結しても、主鎖には結合していないため、図 3c に示すように凍結した“側鎖”である CD が形成したフレームワーク内を、主鎖は動き回ることができると考えられる。実際に、中性子準弾性散乱を用いたダイナミクス解析を行ったところ、1 nm 程度の空間内に拘束された主鎖の運動がガラス状態で観測された。通常、主鎖の運動が凍結する過程がガラス転移であり、側鎖の局所運動が副分散を発生させる主要原因であるが、ポリロタキサンガラスでは全く逆である。これは、通常の高分子で側鎖間の相互作用で側鎖の運動が凍結すれば、主鎖の運動も同時に凍結せざるを得ないのに対し、ポリロタキサンでは主鎖の運動が環状成分の幾何学的拘束の範囲内で独立しているためである。このポリロタキサンガラス特有の主鎖の運動性を活用するという、新たな材料設計指針に基づいた機能材料の創製が今後期待される。

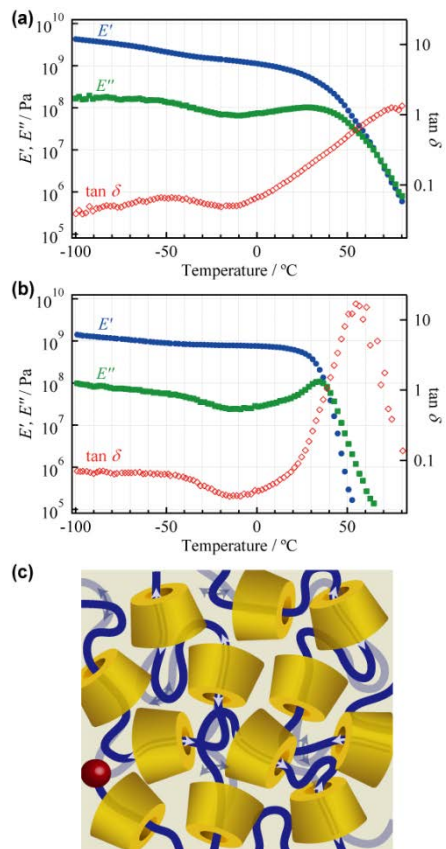


図 3. (a) ポリロタキサンガラスと (b) CD ガラスの動的粘弾性測定の結果。(c) 大きな副分散の起源となる環内部の主鎖運動。わずか 18wt% の主鎖の存在で、粘弾性挙動は大きく変化する。

(2) 延伸で誘起される主鎖-環状分子間のスライドのその場観測と強靭化メカニズムの解明

ポリロタキサンガラスは一般的な高分子ガラスと同等のヤング率を示しながらも、数倍延伸可能な延性材料であることが多い。例えば、ヒドロキシプロピル化 α -CD と PEG から成る包接率 25% のポリロタキサンガラスでは、ヤング率は約 1 GPa で 4 倍以上もの延伸が可能である。降伏点付近で白化を伴うクレージングが観測され、その部分がネッキングしながら最終的には配向硬化を伴う均一な変形をして破断に至る。高分子ガラスなどの硬質材料は延伸すると体積が増えて内部にナノスケールのボイドが発生する。このボイド周辺で応力集中が起きて脆性破壊に至ることが多いが、ポリロタキサンガラスでは安定なクレイズが形成されてネッキングが起これ、それが材料全体に伝搬していく。

この安定なクレイズが形成されるメカニズムを調べるために、放射光 X 線散乱を用いた延伸下での構造解析を行った。ポリロタキサンガラスは結晶性の鋭いピークは示さないが、アモルファスハローと呼ばれる非常にブロードなピークが $q = 4.7 \text{ nm}^{-1}$ 付近に観測される。このピークは CD の修飾基を大きくすることで小角側にシフトすることから、隣接する CD の距離相関を示し

ていると考えられる。このポリロタキサンガラスの場合 $q=4.7\text{nm}^{-1}$ にピークを示しているため、隣接 CD までの平均距離が 1.33 nm ということになる。未修飾の CD の分子サイズが約 1 nm であることから、ヒドロキシプロピル化で肥大化した CD が副成分の PEG によりやや希釈されていると考えれば、妥当な値と言える。このポリロタキサンガラスの延伸に平行な散乱プロファイルを図 4a に示す。奇妙なことに、延伸に伴い小角側にシフトしていたこのハローは、途中で広角側にシフトを始めている。延伸初期では延伸方向に CD 間距離が開いていくが、途中からは延伸に逆らって接近を始め、最終的には延伸前より 0.7 \AA も接近していた。しかも、接近に転じるタイミングが、X 線の透過率が急激に上昇するタイミングに一致し、この現象がネッキング部分で特異的に起こっていることがわかった。CD 間距離が延伸に逆らって接近するには、CD 間に存在していた主鎖が排除される必要がある。そのため、図 4b に示すように主鎖は CD 内をスライドして出ていったと考えられる。

このようなスライドによる主鎖の移動が起こると、CD 間の距離が短くなり密集した部分と、主鎖がむき出しになって配向した部分とに相分離するはずである。実際に、延伸後のサンプルの X 線散乱を測定すると、延伸前はエージングによる結晶化も起こらなかった主鎖の PEG が、延伸後は配向した状態で結晶化していた。未延伸のポリロタキサンガラスでは、主鎖上に環がほぼ均一に分散することで主鎖の結晶化が阻害されているが、環と主鎖の分子内での相分離が起こることで、ある程度の長さをもった主鎖のむき出し部分が配向した状態で形成され、結晶化したものと考えられる。こうして、未延伸状態よりも接近して相互作用が強くなった CD と、主鎖による配向硬化によって、本来破壊の起点となるクレイズ内のフィブリルは安定化したものと考えられる。この、応力印加による環と主鎖の分子内相分離というポリロタキサンガラス特有の強靱化メカニズムに関する成果は、アメリカ化学会誌の ACS Applied Materials & Interfaces に掲載された。

ポリロタキサンの環動性に期待した様々な材料がこれまでに報告され、特異な力学物性は全て環動性に起因すると見なされる場合が多いが、実際に環が主鎖上で動いているところを観測できた例はほとんどない。本研究は、材料中均一に分散した環状分子から来る X 線回折を追跡することで、変形下での環と主鎖の相対的な位置変化が推測可能であるという材料の特性を活かした新しい構造解析の有効性を実証したものである。また、ソフトマテリアルで見られる環動性とは異なり、材料の変形により大きく移動しているのは環ではなくむしろ主鎖であり、実際に材料の変形に誘起されて主鎖が環の中をスライドした様子を間接的にはあるがその場観測で捉えたのはこれが初めての報告である。

(3) ガラス状態での主鎖の運動性と分子構造および力学強度との相関

ポリロタキサンの構造三要素を様々なに変化させた様々なポリロタキサンガラスを作製し、そのダイナミクスと力学物性を系統的に調べ上げることで、強靱なポリロタキサンガラスのための分子設計指針を得ることも成功した。

まず、主鎖高分子が異なるポリロタキサンガラスを比較したところ、PEG やポリプロピレングリコールを主鎖とした場合は、 $-80\sim-50\text{ }^\circ\text{C}$ 付近に非常にブロードだが大きな粘弾性緩和として副分散が観測されたが、ポリブタジエンを主鎖にすると $-70\text{ }^\circ\text{C}$ 付近には急峻な緩和のみが観測された。小角 X 線散乱の結果、そのポリロタキサンガラスには構造の不均一性が見られ、環と主鎖が均一に分散した状態ではないことが示唆された。この温度はポリブタジエンのガラス転移温度に対応していることから、環に覆われていない主鎖が集まった部分のガラス転移を示していると考えられる。材料は非常に脆く、上述したポリロタキサン特有の強靱化メカニズムは機能していないと推測される。これは、環と主鎖の相溶性が低いためすでに分子内相分離を起こしており、応力集中部で

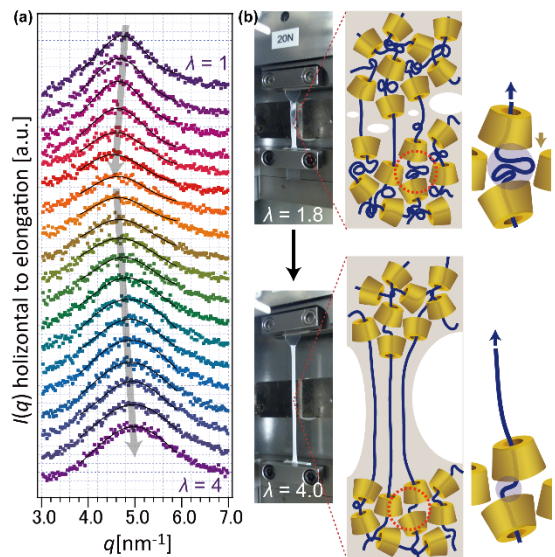


図 4. (a) ポリロタキサンガラスの延伸下における延伸方向に水平な広角 X 線回折プロファイルと (b) 応力集中部分で特異的に観測されるクレージングとネッキング、および分子内相分離構造の模式図。マイクロボイドが発生する応力集中部では、主鎖が環を通して移動することで応力集中を緩和し、結果として環どうしの距離は延伸に逆らって接近することになる。

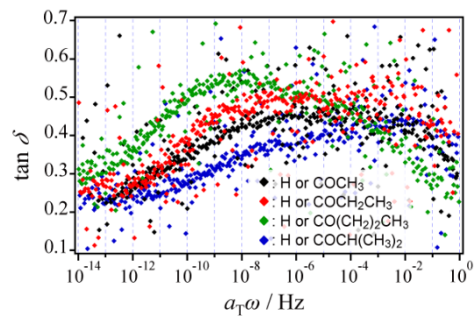


図 5. 異なるアシル基が環状成分に修飾されたポリロタキサンガラスの粘弾性測定で得られた正接損失の周波数依存性。基準温度は

特異的に起こっていた主鎖の環からの引き抜きが起らないことに起因すると考えられる。

次に、環状成分である CD の置換基の異なるポリロタキサンガラスを比較した。炭素数の異なる様々なアシル化ポリロタキサンの粘弾性の結果を図 5 に示す。ガラス状態には主に 2 つの緩和があり、速い緩和は CD ガラスにも観測され、置換基の回転運動等に起因すると考えられ、どの誘導体でも緩和強度に違いはほとんどない。一方で、遅い緩和はアセチル、プロパノイル、*n*-ブタノイルと炭素数が増加するに従い、緩和強度が増大しているのがわかる。しかし、*i*-ブタノイル化体では緩和強度が顕著に低くなった。興味深いことに、この緩和強度の高い *n*-ブタノイル化体とプロパノイル化体は延性を示し、緩和強度の低い二つのガラスは脆性を示した。特に *i*-ブタノイル化体とプロパノイル化体は、ガラス転移温度 (~110 °C) もヤング率 (~1.2 GPa) もほぼ同じであるにも関わらず、力学強度が大きく異なる。副分散は CD が形成するガラス状フレームワーク内を運動する主鎖の分子運動性を反映し、延性を示すポリロタキサンガラスには上述の強化機構の発現が必要だと考えられることから、CD からの主鎖の引き出しには、ある程度主鎖の運動性が必要であることをこの実験結果は示唆している。

また、次項に詳しく述べるように、包接率はガラス転移ダイナミクスに甚大な影響を与えることも明らかになった。分子構造と物性との相関に関するこれらの系統的な研究を通して、強靱なポリロタキサンガラスは相分離なく CD と主鎖が均一に分散し、CD 内での十分な主鎖の運動性があることが明らかとなり、これらの条件を満たす主鎖や環状成分の分子設計が有効であることが明らかとなった。一部の研究成果については、すでにアメリカ化学会誌の *Journal of Physical Chemistry, C* に掲載されている。

(4) ガラス転移挙動に及ぼす幾何学的拘束の効果

図 6a に、包接率が異なるポリロタキサンガラスの動的粘弾性測定の結果を示す。包接率のみ 28、34、38% と異なるが、環状成分は 2-メトキシエチル化 α -CD、主鎖は PEG で共通である。包接率が 28% から 38% まで変化しても環状成分の重量分率は 82% から 85% に変化するのみであるため、どのポリロタキサンも DSC では $8 \pm 3^\circ\text{C}$ に T_g を示し、ポリロタキサンは PEG と CD の相溶ブレンドの一種とみなすことができる。しかし、ガラス転移に伴う粘弾性緩和は包接率の上昇でかなり遅くなっていることがわかる。包接率が 38% のものに注目すると、明らかに二段階の緩和が見られ、包接率 34% でも見にくい一段階の緩和ではない。一段階目（低温側）の緩和は、全てのポリロタキサンガラスで同様の温度域に観測され、DSC で観測されたものと同じ起源であると考えられるため、一般的な高分子と同様に分子間相互作用が支配的なガラス転移であると考えられる。しかし、二段階目（高温側）の緩和は包接率と強い相関があり、分子間相互作用では説明できない。図 6b にマスターカーブ作成時に得られたシフトファクター a_T の温度依存性を示した。最も低包接率のものは、DSC で得られた T_g に至るまでほぼアレニウス型の温度依存性を示し、通常の高分子で見られる協同運動性の急激な増大が見られないが、この原因についてはまだよくわかっていない。しかし、包接率が高くなるにつれて T_g より高い温度でこの依存性から逸脱し、CD と主鎖の協同的な拡散であるミクロブラウン運動が凍結していることがうかがえる。ガラス状態からの昇温過程で考えると、 T_g を超えると分子間相互作用から解放されてすぐに CD の回転運動が始まると考えられるが、CD が並進拡散するためには主鎖だけでなく隣接した CD もある程度協同的に運動する必要がある。つまり、CD の並進は CD 間の主鎖（部分鎖）を介して隣の CD から拘束され、図 6c に示すように部分鎖が十分長ければほとんど拘束を受けないが、部分鎖が短くなると強い拘束を受けると考えられる。このように、一般的な分子間相互作用だけでなく、幾何学的な拘束の効果がガラス転移の振る舞いに大きく影響することを示した本研究成果は、未だメカニズムが明らかになっていないガラス転移機構の解明に向けた世界的な議論の前進に大きく貢献するものであり、アメリカ化学会誌の *Journal of the American Chemical Society* に掲載された。

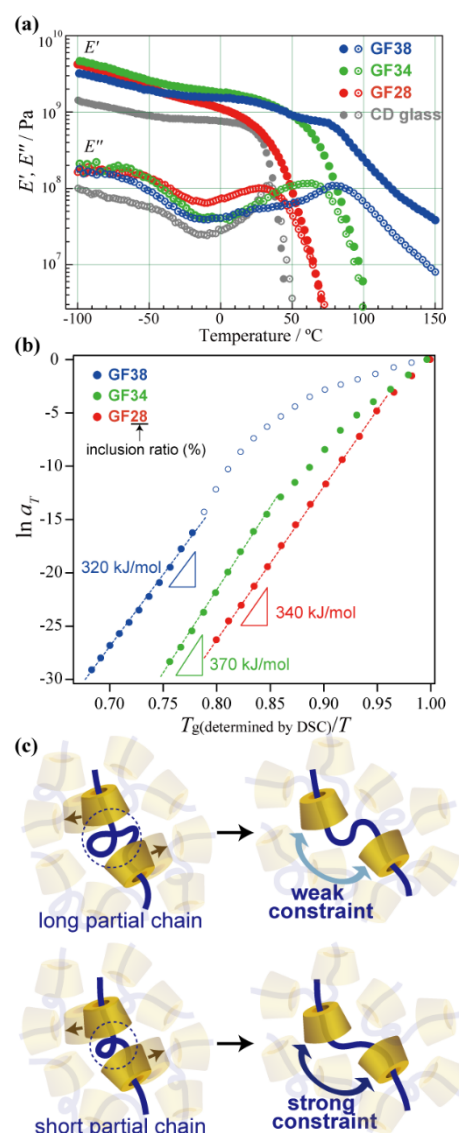


図 6. 包接率の異なるポリロタキサンガラスおよび CD ガラスの (a) 粘弾性と (b) ガラス転移領域における移動因子 a_T のアレニウスプロット。 (c) 主鎖を介した隣接 CD 間の幾何学的拘束は包接率に伴って強くなり、CD の並進拡散とミクロブラウン運動を遅延させる。

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 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kato Kazuaki, Ohara Akihiro, Yokoyama Hideaki, Ito Kohzo	4. 巻 141
2. 論文標題 Prolonged Glass Transition due to Topological Constraints in Polyrotaxanes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 12502 ~ 12506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.9b06063	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, Ikeda Yuta, Ito Kohzo	4. 巻 8
2. 論文標題 Direct Determination of Cross-Link Density and Its Correlation with the Elastic Modulus of a Gel with Slidable Cross-Links	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Macro Letters	6. 最初と最後の頁 700 ~ 704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmacrolett.9b00238	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, Ayaka Hori, Kohzo Ito	4. 巻 147
2. 論文標題 An efficient synthesis of low-covered polyrotaxanes grafted with poly(ϵ -caprolactone) and the mechanical properties of its cross-linked elastomers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 67-73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymer.2018.05.072	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 Akira Tanaka, Kazuaki Kato, Kohzo Ito, Kenji Urayama.	4. 巻 14
2. 論文標題 Pronounced Effects of the Densities of Threaded Rings on the Strain-Dependent Poisson's Ratio of Polyrotaxane Gels with Movable Cross-Links	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 2808-2815
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8SM00257F	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 Kanta Yanagi, Norifumi L. Yamada, Kazuaki Kato, Kohzo Ito, and Hideaki Yokoyama	4. 巻 34
2. 論文標題 Polyrotaxane Brushes Dynamically Formed at a Water/Elastomer Interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 5297-5302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.8b00649	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 Lan Jiang, Chang Liu, Koichi Mayumi, Kazuaki Kato, Hideaki Yokoyama, Kohzo Ito.	4. 巻 30
2. 論文標題 Highly Stretchable and Instantly Recoverable Slide-Ring Gels Consisting of Enzymatically Synthesized Polyrotaxane with Low Host Coverage	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 5013-5019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemmater.8b01208	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 Guan Li, Kazuaki Kato, Koichi Mayumi, Hideaki Yokoyama, Kohzo Ito.	4. 巻 93
2. 論文標題 Efficient Mechanical Toughening of Polylactic Acid without Substantial Decreases in Stiffness and Transparency by the Reactive Grafting of Polyrotaxanes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry	6. 最初と最後の頁 107-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10847-018-0857-2	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, Kaito Nemoto, Koichi Mayumi, Hideaki Yokoyama, and Kohzo Ito	4. 巻 9
2. 論文標題 Ductile Glass of Polyrotaxane Toughened by Stretch-Induced Intramolecular Phase Separation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 32436-32440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1021/acsami.7b10845	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 Chang Liu, Hirokazu Kadono, Koichi Mayumi, Kazuaki Kato, Hideaki Yokoyama, Kohzo Ito.	4. 巻 6
2. 論文標題 Unusual Fracture Behavior of Slide-Ring Gels with Movable Cross-Links	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Macro Letters	6. 最初と最後の頁 1409-1413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmacrolett.7b00729	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 Kosuke Minato, Koichi Mayumi, Rina Maeda, Kazuaki Kato, Hideaki Yokoyama, Kohzo Ito.	4. 巻 128
2. 論文標題 Mechanical properties of supramolecular elastomers prepared from polymer-grafted polyrotaxane	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 386-391
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymer.2017.02.090	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, Tomoki Mizusawa, Hideaki Yokoyama, Kohzo Ito	4. 巻 121
2. 論文標題 Effect of Topological Constraint and Confined Motions on the Viscoelasticity of Polyrotaxane Glass with Different Interactions between Rings	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 1861-1869
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.6b11362	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31件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 加藤和明・大原明宏・根本開人・眞弓皓一・横山英明・伊藤耕三
2. 発表標題 Stretch-induced Intramolecular Phase Separation of Cyclodextrin-based Polyrotaxane Glass
3. 学会等名 The 19th International Cyclodextrin Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤和明・大原明宏・根本開人・眞弓皓一・横山英明・伊藤耕三
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスのダイナミクスに及ぼす環サイズおよび包接率の効果
3. 学会等名 第67回高分子学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤和明、谷口正幸、眞弓 皓一、横山 英明、伊藤 耕三
2. 発表標題 硬質延性ポリロタキサン材料を実現する分子設計
3. 学会等名 第67回高分子討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤和明、大原明宏、横山英明、伊藤耕三
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスの転移挙動に及ぼす幾何学的拘束の効果
3. 学会等名 第66回レオロジー討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤和明・大原明宏・根本開人・眞弓皓一・横山英明・伊藤耕三
2. 発表標題 Peculiar Mechanical Properties Attributed to the Mechanically Interlocked Structure of Polyrotaxane Glasses
3. 学会等名 12th SPSJ International Polymer Conference (IPC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤和明、大原明宏、横山英明、伊藤耕三
2. 発表標題 Effect of Topological Constraints on the Glass Transition Behaviors of Polyrotaxanes
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuaki Kato, Kaito Nemoto, Koichi Mayumi, Hideaki Yokoyama, Kohzo Ito
2. 発表標題 Peculiar Viscoelasticity and Tensile Behavior of Polyrotaxane Glass
3. 学会等名 253rd American Chemical Society, National Meeting & Exposition (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 谷口正幸・加藤和明・眞弓皓一・横山英明・伊藤耕三
2. 発表標題 修飾基の異なるポリロタキサンガラスの力学物性
3. 学会等名 第66回高分子学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 根本開人、加藤和明、眞弓皓一、横山英明、伊藤耕三
2. 発表標題 延伸によるポリロタキサンガラスの相分離と強靱化機構
3. 学会等名 第66回高分子学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤和明
2. 発表標題 シクロデキストリンを基盤としたポリロタキサン材料の開発
3. 学会等名 第34回シクロデキストリンシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 根本開人、加藤和明、眞弓皓一、横山英明、伊藤耕三
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスの伸張誘起相分離
3. 学会等名 第34回シクロデキストリンシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤和明、根本開人、谷口正幸、眞弓皓一、横山英明、伊藤耕三
2. 発表標題 ポリロタキサン材料のダイナミクスと力学特性
3. 学会等名 第66回高分子討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 根本開人、加藤和明、谷口正幸、眞弓皓一、横山英明、伊藤耕三
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスの分子構造と破壊機構の関係
3. 学会等名 第66回高分子討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 谷口正幸、眞弓皓一、加藤和明、横山英明、菊地龍弥、古府麻衣子、中島健次、金谷利治、伊藤耕三
2. 発表標題 中性子準弾性散乱によるポリロタキサンガラスのダイナミクス解析
3. 学会等名 第66回高分子討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤和明、根本開人、眞弓皓一、横山英明、伊藤耕三
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスの破壊機構
3. 学会等名 第65回レオロジー討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤和明、根本開人、眞弓皓一、横山英明、伊藤耕三
2. 発表標題 異なる分子構造を有するポリロタキサンガラスの破壊機構
3. 学会等名 平成29年度 繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 谷口正幸、眞弓皓一、加藤和明、横山英明、菊地龍弥、古府麻衣子、中島健次、金谷利治、伊藤耕三
2. 発表標題 中性子準弾性散乱によるポリロタキサンガラスのダイナミクス解析
3. 学会等名 日本中性子科学会第17回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuaki Kato, Kaito Nemoto, Koichi Mayumi, Hideaki Yokoyama, Kohzo Ito
2. 発表標題 Stretch-induced Intramolecular Phase Separation in Polyrotaxane Glasses for The Mechanical Toughness
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuaki Kato, Kohzo Ito
2. 発表標題 Diversity of Chemical Structures and Mechanical Properties in Polyrotaxane-based Materials
3. 学会等名 18th International Cyclodextrin Symposium (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazuaki Kato, Tomoki Mizusawa, Hideaki Yokoyama, Kohzo Ito
2. 発表標題 Viscoelastic Properties of Polyrotaxane Glass
3. 学会等名 17th International Congress on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazuaki Kato, Hideaki Yokoyama, Kohzo Ito
2. 発表標題 Peculiar Mechanics of Polyrotaxane Glass
3. 学会等名 11th SPSJ International Polymer Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Akihiro Ohara, Kazuaki Kato, Koichi Mayumi, Hideaki Yokoyama, Kohzo Ito
2. 発表標題 Viscoelasticity of polyrotaxane glass with different inclusion ratios
3. 学会等名 11th SPSJ International Polymer Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 加藤和明、水澤知希、横山 英明、伊藤 耕三
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスにおけるガラス転移と副分散
3. 学会等名 第65回高分子年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 上沼駿太郎、加藤 和明、眞弓 皓一、横山 英明、伊藤 耕三
2. 発表標題 メトキシエチル化ポリロタキサン架橋体の粘弾性
3. 学会等名 第65回高分子年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大原 明宏、眞弓 皓一、加藤 和明、横山 英明、伊藤耕三
2. 発表標題 化学構造の異なるポリロタキサンガラスのダイナミクス
3. 学会等名 第65回高分子年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 加藤和明、伊藤耕三
2. 発表標題 特異な力学物性を示すポリロタキサンガラス
3. 学会等名 第33回シクロデキストリンシンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 加藤和明、大原 明宏、根本 開人、眞弓 皓一、横山 英明、伊藤 耕三
2. 発表標題 インターロック構造に由来する特異なダイナミクスと大変形挙動を示すポリロタキサンガラス
3. 学会等名 第65回高分子討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大原 明宏、加藤 和明、眞弓 皓一、横山 英明、伊藤耕三
2. 発表標題 包接率の異なるポリロタキサンガラスのダイナミクス
3. 学会等名 第65回高分子討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 根本 開人、加藤和明、眞弓 皓一、横山 英明、伊藤 耕三
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスの伸長誘起相分離による強靱化
3. 学会等名 第65回高分子討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 根本 開人、加藤和明、眞弓 皓一、横山 英明、伊藤 耕三
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスの伸張誘起相分離と強靱化機構
3. 学会等名 平成28年度繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 加藤和明、根本 開人、大原 明宏、眞弓 皓一、横山 英明、伊藤 耕三
2. 発表標題 ポリロタキサンガラスのダイナミクスと伸張特性
3. 学会等名 平成28年度繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

https://researchmap.jp/kazuaki-kato/?lang=japanese

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