



分野:自然科学系

キーワード:高靱性エラストマー、ロタキサン、メカノフォア、絡み合いネットワーク、段階的なエネルギー散逸、SDGs

## 柔らかく受け流して壊れにくい高分子材料を開発 —分子が「動く・切れる・絡み合う」ことで、強い力から材料を守る新設計—

### 【研究成果のポイント】

- ◆ 自らの分子構造を変えながら外部からの力を受け流す、新しい高靱性エラストマーを開発。
- ◆ 力が加わると、分子が「動く」「一部が切れる」「鎖どうしが絡み合う」という 3 つの変化が順番に起こり、材料の破壊を抑えることを解明。
- ◆ 従来型のポリウレタンエラストマーと比べて靱性が約 5 倍に向上。柔らかく壊れにくい材料として、製品の長寿命化や信頼性向上への貢献に期待。

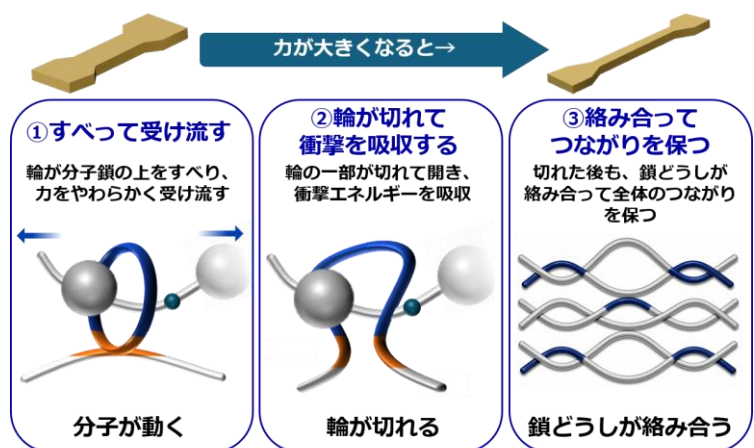
### ❖ 概要

大阪大学大学院理学研究科高分子科学専攻の大学院生の李雪さん(博士後期課程)、Xiao Chunlin 特任研究員(常勤)、井筒治棋さん(博士後期課程)、浦川理准教授、井上正志教授(現大阪大学名誉教授)、小林裕一郎助教、山口浩靖教授らの研究チームは、**強い力を受けても壊れにくい高靱性エラストマーの開発に成功しました。**

エラストマーは、タイヤやゴム製品、柔軟な電子材料など、私たちの身の回りのさまざまな製品に使われているゴム状の高分子材料です。柔らかくよく伸びる一方で、強い力が加わると損傷や破壊につながりやすく、柔らかさと壊れにくさを両立することが大きな課題でした。

今回、研究グループは、**分子が自らの形やつながり方を変えながら力を受け流す材料を設計**しました。具体的には、力を受けたときに、まず分子が動いて力を逃がし、さらに強い力が加わると分子の一部が切れて衝撃を吸収し、最後に切れた後の高分子鎖が絡み合うことで材料全体の構造を保つ仕組みを 1 つの材料に組み込みました。その結果、従来型のポリウレタンエラストマーと比べて靱性が約 5 倍に向上し、**柔らかさと壊れ**

### 力が加わると、分子が順番に形を変えて材料を守る



3段階の変化によって、**柔らかさと壊れにくさを両立**  
**柔らかく、壊れにくい**

図 1. 力が加わると、分子が「すべる」「切れる」「絡み合う」と順番に働き、材料が壊れにくくなる仕組み

にくさを両立する材料を実現しました。高分子材料の靱性を向上させることで、製品の長寿命化、機械的損傷による故障の低減、材料廃棄や交換頻度の削減につながる事が期待されます。

本研究成果は、英国科学誌「Nature Communications」に、7月1日(水)に公開されました。

#### 【山口教授・小林助教のコメント】

本成果は、超分子化学に基づく分子設計を、エラストマーの高靱化というマクロな材料物性の向上へと結びつけた点に学術的意義があります。力を受けた際に材料内部で生じる分子レベルの変化を実験的に捉え、分子のスライド、力による分子切断、高分子鎖の絡み合いが段階的に働くことを明らかにしました。高分子科学専攻の合成と物性の研究者が1つのチームとなって取り組むことで、分子設計から物性解析までを一貫して進めることができた成果です。

#### ❖ 研究の背景

エラストマーはゴムのような優れた伸縮性と柔軟性を持つ高分子材料の総称で、タイヤ、ゴム製品、フレキシブルデバイス、ウェアラブル電子機器などに広く使われています。よく伸び、形を変えやすいことが大きな特徴ですが、一方で、強い力や繰り返しの変形を受けると、損傷や破壊が起こる場合があります。このような材料を壊れにくくするためには、外部から加わる力を材料内部でうまく逃がすことが重要です。

これまでも、分子が動く仕組みや、力によって一部の結合が切れる仕組みなどを利用して、材料の壊れにくさを高める研究が行われてきました。しかし、多くの場合、1つの仕組みだけに頼るものか、複数の仕組みを組み込んでもそれらを順序よく働かせることは難しいという課題がありました。そこで研究グループは、材料が受ける力の大きさに応じて、異なる分子レベルの変化が段階的に起こる材料を設計しました。これにより、弱い力から強い力まで、材料が状況に応じて力を受け流し続けることを実現しました。

#### ❖ 研究の内容

研究グループは、新たに設計したロタキサン型分子架橋剤をポリウレタンエラストマーに導入しました(図 2a)。ロタキサンとは、輪の形をした分子が軸状の分子に通された構造で、輪が軸に沿って動くことができるという特徴を持ちます。本研究で開発した材料では、力が加わると、まずロタキサン構造の輪が軸に沿って動きます(図 1)。この分子の動きにより、外部から加わった力の一部が吸収されます。さらに大きな力が加わると、あらかじめ分子内に組み込んでおいた力に応答する部分が切れます。この切断は材料の破壊ではなく、強い力を逃がすための犠牲的な変化として働きます。加えて、切れた後に生じた高分子鎖は、互いに絡み合うことで材料全体の構造を保ちます。つまり、この材料は、力を受けたときに単に壊れるのではなく、内部構造を変えながら力を受け流し、壊れにくさを保つことができます。

この仕組みを明らかにするため、研究グループは、試料に異なる大きさの変形を加えながら、分子構造の変化を詳しく解析しました。フーリエ変換赤外分光法(FTIR)<sup>\*1</sup>により、弱い変形では分子の切断は起こらず、主にロタキサン構造の動きによって力が逃がされることが分かりました(図 2c)。一方、大きな変形を加えると、力に応答する部分が切断されたことを示す信号が観測されました。さらに、動的粘弾性測定(DMA)<sup>\*2</sup>により、切断後に生じた高分子鎖が互いに絡み合い、材料の構造維持に寄与していることを確認しました。

これらの結果から、本材料では、分子の動き、分子の切断、高分子鎖の絡み合いという3つの変化が順番に働き、材料の高い靱性を生み出していることが明らかになりました(図 2d)。開発したエラストマーは、従来型のポリウレタンエラストマーと比較して靱性が約5倍に向上し、優れた耐破壊性を示しました(図 2b)。

#### ❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

本研究は、柔らかい材料を壊れにくくするための新しい分子設計指針を示すものです。材料が力を受けたときに、自らの内部構造を変えながら力を受け流すという考え方は、今後の高分子材料開発において重要な設計戦略になると期待されます。

また、このような高靱性エラストマーは、タイヤ、ゴム製品、フレキシブルデバイス、ウェアラブル電子機器など、繰り返し変形や衝撃を受ける材料への応用が期待されます。製品の長寿命化や故障の低減につながることで、材料の廃棄や交換頻度の削減にも貢献する可能性があります。

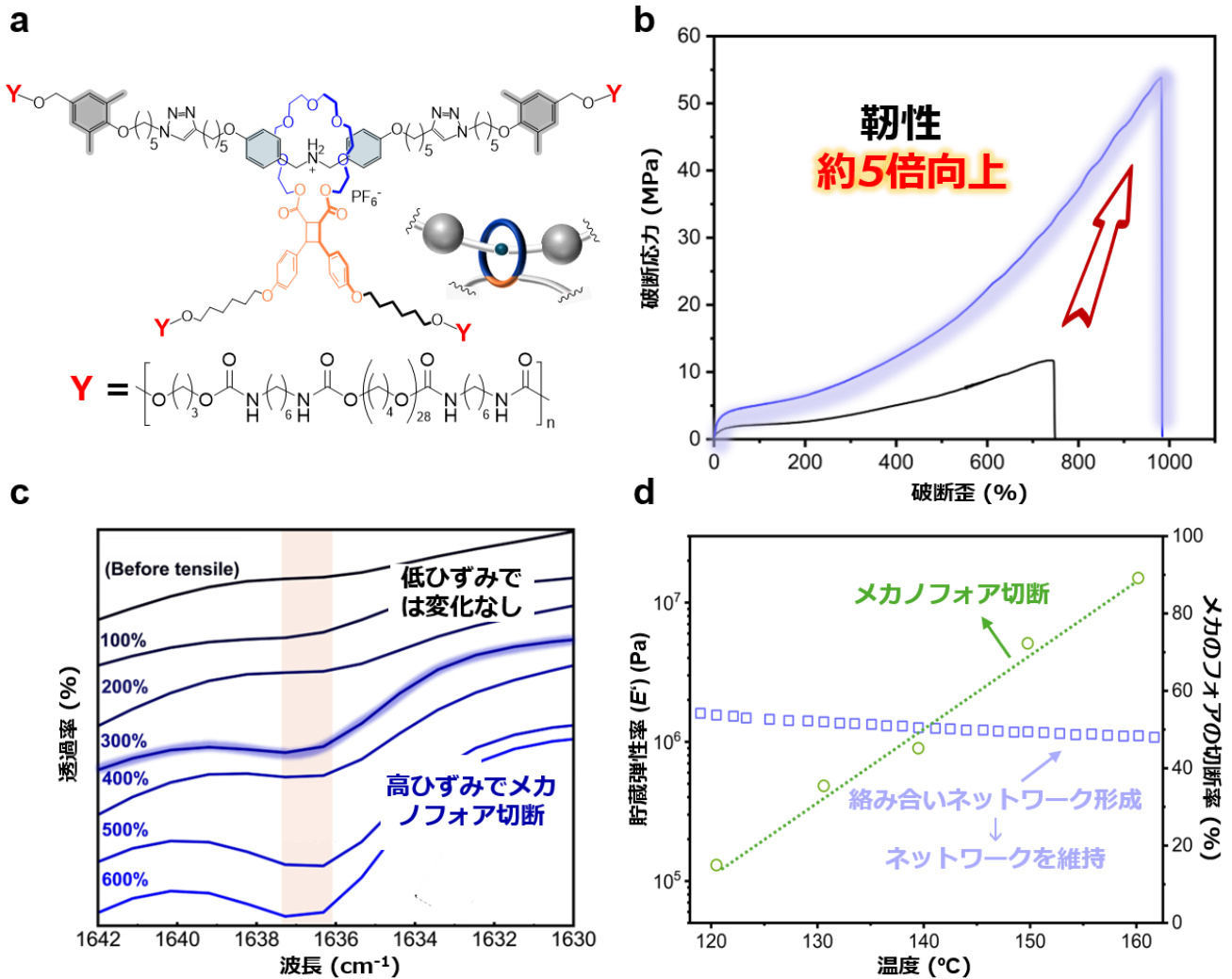


図 2. (a) 開発した高靱性エラストマーの分子構造。(b) 従来型材料と比較した靱性の向上。(c) 力を受けた際の分子構造変化を示す赤外分光測定。(d) 切断後の高分子鎖の絡み合いによる構造維持

#### ❖ 特記事項

本研究成果は、2026年7月1日(水)に英国科学誌「Nature Communications」(オンライン)に掲載されました。

タイトル: “Toughening Elastomer via Sequentially Activated Multi-Pathway Energy Dissipation”

著者名: Xue Li, Chunlin Xiao, Haruki Izutsu, Osamu Urakawa, Tadashi Inoue, Yuichiro Kobayashi, Hiroyasu Yamaguchi

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-74148-z>

なお、本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム(SPRING)(JPMJSP2138)、JST 戦略的創造研究推進事業 さきがけ(JPMJPR2474)、JSPS 科研費 挑戦的萌芽(JP22K19066、JP24K21673)、基盤 B(JP23K23413、JP24K01539)、公益財団法人 旭硝子財団、公益財団法人 徳山科学技術振興財団の一環として実施され、大阪大学理学研究科技術部分析器測定室の協力を得て行われました。

#### ❖ 用語説明

##### ※1 フーリエ変換赤外分光法(FTIR)

物質に赤外線を照射し、その吸収スペクトルから分子構造や化学結合の変化を解析する手法。

##### ※2 動的粘弾性測定(DMA)

材料に繰り返し小さな変形を与え、その応答から材料の硬さやエネルギーの失われ方を評価する手法。

#### ❖ SDGs目標



#### ❖ 参考 URL

山口浩靖教授 研究者総覧 <https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/7df0c1f12e0cfbc6.html>

小林裕一郎助教 研究者総覧 <https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/e66684f95979c53c.html>

井上正志名誉教授 研究者総覧 <https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/1b89f9d2a2b34abe.html>

浦川理准教授 研究者総覧 <https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/6fbc581dfecb41ac.html>

#### ❖ 本件に関する問い合わせ先

<研究に関するお問い合わせ>

大阪大学 大学院理学研究科 特任研究員(常勤) Xiao Chunlin (シャオ チュンリン)

E-mail: xiaoc20@chem.sci.osaka-u.ac.jp

大阪大学 大学院理学研究科 助教 小林裕一郎(こばやし ゆういちろう)

E-mail: kobayashiy11@chem.sci.osaka-u.ac.jp

大阪大学 大学院理学研究科 教授 山口浩靖(やまぐち ひろやす)

E-mail: hiroyasu@chem.sci.osaka-u.ac.jp

<広報に関するお問い合わせ>

大阪大学 理学研究科 庶務係

TEL: 06-6850-5280 FAX: 06-6850-5288

E-mail: ri-syomu@office.osaka-u.ac.jp

❖ **発信先 報道機関**

大阪大学から 大阪科学・大学記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会

プレスリリース時には、関連する機関の問い合わせ先も記載しておりますが、ホームページ掲載時には、本学理学研究科関係者のみ掲載としております。