

遠隔的に剥離・解体可能な光応答性エラストマーの開発 —貼って繋げて光ではずせるゴム状新素材—

1. 発表者

岡 美奈実 (東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻 博士課程2年)

高木 秀彰 (高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 助教)

宮澤 知孝 (東京工業大学 物質理工学院 助教)

Robert M. Waymouth (Professor in Chemistry, Stanford University)

本多 智 (東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻 助教)

2. 発表のポイント

- ◆光刺激を及ぼすと無溶媒下で固体状態を維持したまま可逆的かつ大幅に粘弾性が変化するシリコーンエラストマーを開発しました。
- ◆このシリコーンエラストマーを市販のレーザーポインターで遠隔的に剥離・解体できる粘着剤・ゴム紐として応用することに成功しました。
- ◆解体性粘接着剤や可逆的に変形する3Dプリンター用材料などさまざまな材料開発への展開が期待されます。

3. 発表概要

東京大学大学院総合文化研究科の岡美奈実(博士後期課程2年)らは、光刺激を作用させることで粘弾性を遠隔操作できる光解体・再生式網目状物質(PRN)を開発しました。この物質は複数の部品を接合するための粘着剤やゴム紐として利用可能であり、光刺激を及ぼすことで照射部分のみの粘着性・粘弾性を低下させて遠隔的に剥離・解体させることができます。またPRNは、剥離・解体された後で光刺激が及ぼされないでいると元の粘着性・粘弾性に戻るため、再利用可能な材料である特徴があります。さらに特筆すべき点は、この遠隔的な剥離・解体操作をネット通販でも購入可能な市販のレーザーポインターで実現できることです。高額な試験研究用の装置に頼ることなく、我々の身近にある安価な民生品を有効利用して物性を制御できるPRNには、解体性粘接着剤や解体性ゴムなど様々な用途への展開可能性を期待できます。

この研究成果は、*Advanced Science* 誌に掲載されました。

4. 発表内容

① 研究の背景・先行研究における問題点

網目状物質は、粘接着剤、シーラント、タイヤ、さらには3Dプリンティング材料に至るまで我々の生活に浸透しています。こうした網目状物質が利用されるあらゆる場面において、有機溶媒を必要とせず、解体・再利用可能なシステムを開発することが持続可能な社会を創る観点から切望されています。従来、解体・再利用に利用されてきた外部刺激の多くは熱でした。熱は材料全体に及ぼす刺激としては魅力的ですが、周囲に伝播するため局所的に作用させることが難しいというデメリットもあります。そこで本研究グループでは、これまでエラストマー(合成ゴム)として広く利用されているポリシロキサン(シリコーン材料)の粘弾性を光刺激で変化させる方法論を独自に開発してきました。ところが従来研究では、

柔軟なシリコンゴム程度の弾性率をもつ光応答性のエラストマーを合成することが難しく、その解決には高分子鎖の緻密な制御（分子量や分岐の制御）を必要としていました。

② 研究内容

研究グループは、有機溶媒への溶解性に乏しい多官能性シラノールが、開環重合触媒として知られる尿素誘導体によって可溶化されることを見出しました（図 1）。また、この発見を契機に、尿素誘導体存在下、多官能性シラノールを開始剤とする環状シロキサンの開環重合により分子量の揃った分岐状ポリシロキサンを合成することに成功し、最終的に光解体・再生式網目状物質（PRN）の開発を達成しました。

この PRN は、シリコンゴムと同じような弾性的な性質をもつエラストマーであり、光刺激に対して良好な応答性を示します（図 2）。光刺激に伴う力学物性の変化を調べたところ、貯蔵弾性率（ G' ）が 65 kPa から 25 kPa 程度に低下しました。また、光の照射をやめると G' が 65 kPa 程度に戻り、この変化を何度も繰り返せることが分かりました。この変化は、シリコンゴムが数倍柔らかくなり、また硬くなる変化を何度も繰り返していることに相当します。

続いて研究グループは、PRN を「光で解体・再利用できるフォトメルト粘着剤」および「光で切れるエラストマー」として応用することに成功しました（図 3）。さらに、これらの検討を通じて PRN は、ネット通販で誰でも簡単に購入できる市販のレーザーポインターにも鋭敏に応答することを見出しました。

この研究成果において、東京大学は研究の発案、物質の合成、および物性測定を実施しました。高エネルギー加速器研究機構と東京工業大学は物質の内部構造を特定するための小角 X 線散乱実験の実施、およびデータの解析を行いました。Stanford University は、物質の合成に必要な触媒を開発しました。

③ 社会的意義・今後の予定

この研究成果によって、光が当たった部分のみ何度も大幅な粘弾性変化を繰り返す光応答性シリコンゴムの開発が可能になりました。高価な光照射装置を使用することなく、簡単に安価で入手可能なレーザーポインターで照らすだけで遠く離れたところから剥離・解体できる物質である点は、応用面でも極めて重要です。現在、実用化を目指した種々の研究開発が進行中で、今後は用途ごとの物性のチューニングを進める予定です。

本研究は、科学研究費補助金・新学術領域研究（研究領域提案型）「次世代物質探索のための離散幾何学」（18H04479）、科学研究費補助金（18K14071、20K21218、および 21H01632）、公益財団法人 花王芸術・科学財団、および公益財団法人 東電記念財団の助成により実施されました。

5. 発表雑誌

雑誌名： *Advanced Science*（8月2日 Early View 掲載）

論文タイトル：“Photocleavable Regenerative Network Materials with Exceptional and Repeatable Viscoelastic Manipulability”

著者： Minami Oka, Hideaki Takagi, Tomotaka Miyazawa, Robert M. Waymouth, and Satoshi Honda*

DOI 番号： 10.1002/advs.202101143

6. 添付資料



図 1：多官能性シラノールの開始剤懸濁液（左）が尿素誘導体の添加による可溶化を経て透明な溶液となった様子（右）の写真。

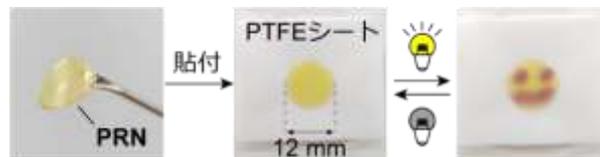


図 2：合成した PRN（左）を PTFE シートに貼付して固定し（中央）、光を照射して狙った部分のみを応答させた様子（右）の写真。

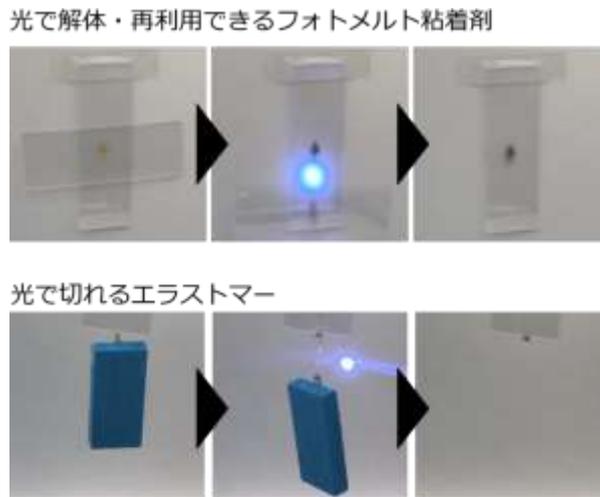


図 3：（上）PRN を粘着剤として利用して貼り付けられた 2 枚のスライドガラスに対してレーザーポインターで光をあて、ガラスを剥離できることを示した写真。（下）PRN をゴム紐として利用して繋げたスライドガラスと積み木の接続部分の PRN に対してレーザーポインターで光をあてると、PRN のおよそ中央部分で切断・分離できることを示した写真。