

自己修復とリサイクルがともに可能な光学樹脂を開発

-ディスプレイや高性能レンズの保護フィルムとして期待-

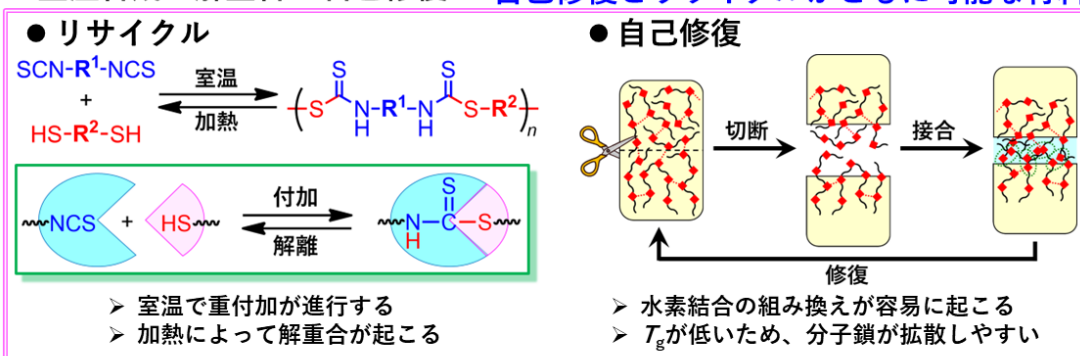
九州工業大学大学院工学研究院 吉田嘉晃准教授、フランス・ロレーヌ大学 Dimitrios Meimaroglou 准教授らの共同研究グループは、ポリジチオウレタン（PDTU）と呼ばれる光学特性^{*1}に優れた樹脂を用いて、常温常圧で傷や破断が自然に修復するプラスチックフィルムを開発しました。また、同グループは、そのプラスチックフィルムを加熱することで原料に分解し、その分解した原料からプラスチックフィルムを再生することに成功しました。この成果は、スマートフォンのディスプレイやメガネレンズの表面の傷が自然に治る保護フィルムなどへの応用が期待でき、また、それらを廃棄する際、熱で簡単に分解してリサイクルすることができるため、プラスチックごみの削減や資源循環に貢献できます。

ポイント

- ・循環経済などの観点から、自己修復性や易リサイクル性を示す光学樹脂の開発が期待されている。
- ・ポリジチオウレタンが、光学特性、自己修復性、易リサイクル性に優れていることを明らかにした。
- ・自己修復とリサイクルがともに可能な光学樹脂の新しい設計指針を示すことができた。

従来、光学フィルム^{*2}に用いられる樹脂と、傷の修復が可能な樹脂、リサイクルしやすい樹脂のそれぞれの分子構造は異なる設計指針で合成されることが多く、それらすべての特徴を持つ樹脂はこれまで開発されていませんでした。今回、本研究グループは、光学特性、自己修復性^{*3}、易リサイクル性^{*4}の全てに優れたポリジチオウレタンを開発し、その設計指針とともに自己修復性や易リサイクル性のメカニズムも明らかにしました（図）。

☑室温合成☑解重合☑自己修復 ⇒ 自己修復とリサイクルがともに可能な材料



☑屈折率☑透明性☑柔軟性 ⇒ 光学フィルムとして応用可能な機能

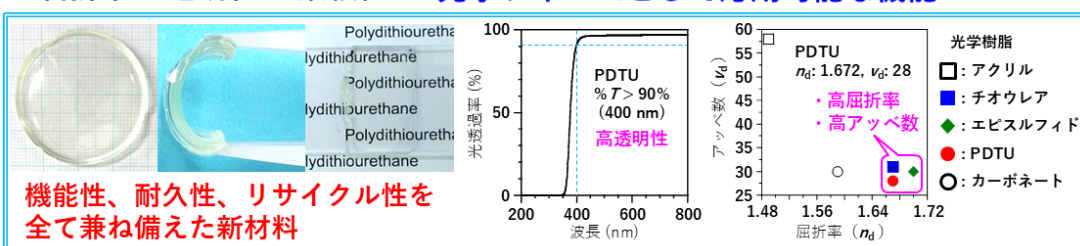


図. ポリジチオウレタンの構造と特徴

この成果は、「傷ついても修復し、壊れても再生できる光学フィルム」という新しいジャンルの材料創出に寄与するものと考えられます。ポリジチオウレタンは屈折率^{*5} とアッペ数^{*6} がともに高いことも特徴です。メガネレンズの素材に屈折率が高いプラスチックを使うことで度数が強い薄型レンズを作ることができます。しかし、多くの屈折率が高いプラスチック素材はアッペ数が低くなる性質があるため、色のにじみが出やすくなります。高屈折率かつ高アッペ数のプラスチック素材を使うことで、度数が強く、薄型で、色のにじみが少ないメガネレンズを作ることができます。また、メガネレンズやディスプレイなどの保護フィルムは、それらの素材と同程度の屈折率とアッペ数を持つことが望ましいとされています。ポリジチオウレタンは、高屈折率（1.65 以上）かつ高アッペ数（28 以上）として実用されているチオウレア樹脂やエピスルフィド樹脂と同程度の物性値を示すため、一般用途のメガネレンズやスマートフォンのディスプレイだけでなく、今後の発展が期待される AR グラスやウェアラブルデバイスなどの高性能なレンズやディスプレイの保護フィルムとしての利用も期待されます。なお、この研究成果は、下記の国際誌に（2025 年 6 月 12 日）掲載されました。

■発表雑誌

雑誌名：「Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry」

論文タイトル：Self-Healing and Recycling Properties of Networked Polydithiourethanes with Reversible Crosslinked Moieties via Hydrogen and Dynamic Covalent Bonding

著者：Yoshiaki Yoshida*, Ryuichi Suenaga, Tsubasa Sakiyama, Halima Alem-Marchand, and Dimitrios Meimaroglou

掲載先：<https://doi.org/10.1002/pol.20250263>

※本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業さきがけ（JPMJPR23NA）、文部科学省科学研究費助成事業（JP22K05241）、北九州産業学術推進機構（FAIS）次世代産業イノベーション創出事業の支援を受けて実施しました。

■用語の説明

- *1 光学特性：物質が光に対して示す性質や特性のこと。光が当たったときに、透過、反射、吸収、屈折などの現象を起こす。
- *2 光学フィルム：光の特性を制御あるいは利用するために設計されたフィルム材料のこと。ディスプレイの反射防止フィルムなどとして使われる。傷や汚れ防止のために使われる保護フィルムも広い意味で含まれる。
- *3 自己修復性：傷や破断などが自然に修復される性質や機能のこと。
- *4 易リサイクル性：外部刺激（熱や光など）や化学反応によって容易に分解され、分解物を原料や素材として再利用できる性質のこと。
- *5 屈折率：光が、ある物体から別の物体を透過するとき、その進む方向が曲がる度合いを表す値のこと。
- *6 アッペ数：レンズを通過する光によって生じる色のにじみの度合いを表す値のこと。この数値が高いほど、色のにじみが少ないことを意味する。

【お問い合わせ】

国立大学法人 九州工業大学 管理本部総務課広報係

電話：093-884-3007 Mail：pr-kouhou@jimu.kyutech.ac.jp

国立研究開発法人 科学技術振興機構 広報課

電話：03-5214-8404 Mail：jstkoho@jst.go.jp

【研究内容に関するお問い合わせ】

国立大学法人 九州工業大学 大学院工学研究院物質工学研究系

准教授 吉田 嘉晃

電話：050-1739-6148 Mail：yoshida.yoshiaki951@mail.kyutech.jp

【JST 事業に関するお問い合わせ】

国立研究開発法人 科学技術振興機構 戦略研究推進部

グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔

電話：03-3512-3526 Mail：presto@jst.go.jp

【研究概要】

<背景>

近年、資源の有効活用や廃棄物の削減などを目的として、傷や破断を自身で修復可能な自己修復性材料やリサイクルしやすい材料の開発が進められています。特に、循環経済などの観点からプラスチックの資源循環が促進されており、レンズやフィルムなどの光学樹脂製品においても長寿命化および再利用化するための技術革新が強く求められています。しかし、レンズやフィルムの素材となる光学樹脂は数多く開発されていますが、それらに自己修復性やリサイクル性を付与する分子設計は明確になっていなかったため、これまで自己修復とリサイクルがともに可能な光学樹脂は開発されていませんでした。

そこで、本研究グループは、光学特性と自己修復性に優れ、任意のタイミングで容易に分解および再生することができる光学樹脂の開発を目指しました。

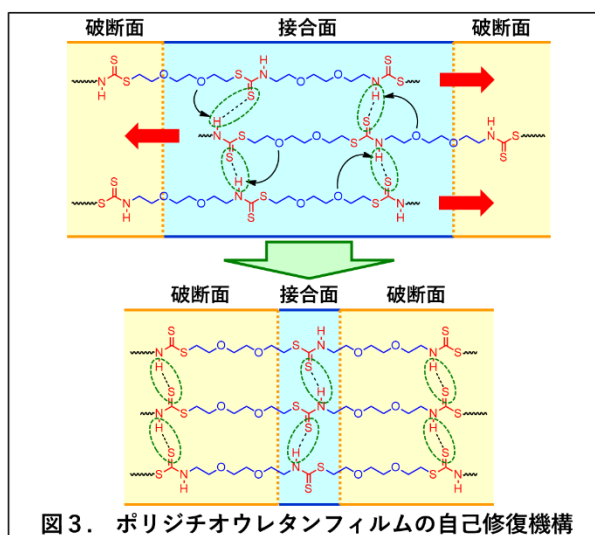
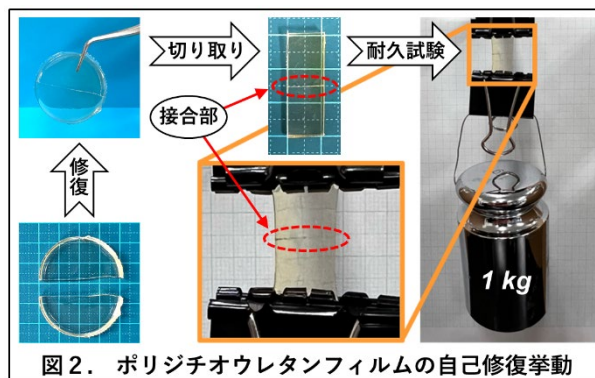
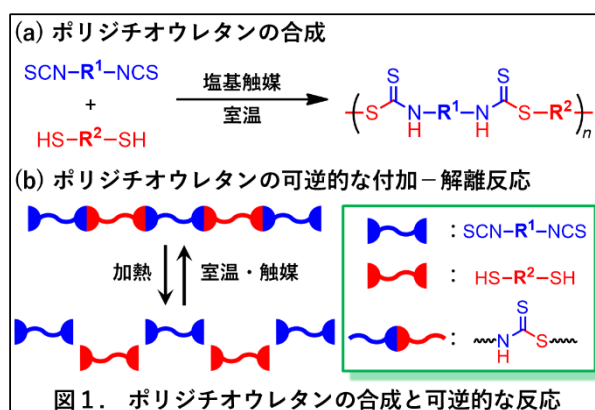
<研究内容>

ジイソチオシアナート類とジチオール類の重付加は塩基触媒を用いると室温で容易に進行し、高分子量のポリジチオウレタン (PDTU) が合成されます (図 1a)。一方、PDTU を加熱処理すると活性な末端基を有するオリゴマーに分解され、このオリゴマーに塩基触媒を加えると重付加反応が再度進行し、分解前と同程度の分子量を有する PDTU が得られます (図 1b)。本研究グループは、この現象がイソチオシアナート基とチオール基の可逆的な付加-解離反応に起因することを明らかにしており、この可逆反応は複数回繰り返し可能であることからリサイクル性ポリマーとして応用できると考えました。

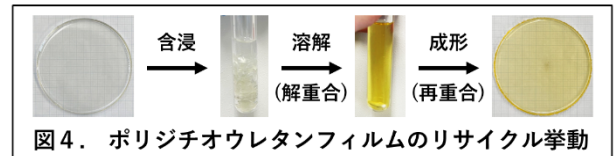
また、本研究グループは、PDTU の基本骨格がジチオウレタン結合で構成され、そのジチオウレタン構造に起因する分子間の水素結合は典型的なウレタン構造と比べて著しく弱い分子間力となるため、PDTU の分子運動を活性化することができれば、PDTU が自己修復性を発現すると考えました。

そこで、主鎖にエーテル構造を有する PDTU から成形したフィルムの自己修復性を評価したところ、フィルムを破断した直後にその断面を互いに押し当てると数分程度で接合することがわかりました。さらに、常温常圧下で長時間静置することで切断部が完全に修復され、切断前と同程度の強度まで回復することがわかりました (図 2)。これは PDTU のジチオウレタン部位同士が分子鎖間で水素結合を形成するだけでなく、ジチオウレタン部位とエーテル酸素間でも水素結合が形成され、それらの水素結合の組み換えに伴い破断面に存在する高分子鎖が相互貫入されるためと考えられます (図 3)。

しかし、フィルムの修復操作を複数回繰り返し行くと



ころ、回数が多くなるにしたがってフィルムの修復率は低下したため、次に修復率が低下したフィルムのリサイクルを検討しました。フィルムを環状エーテル化合物であるテトラヒドロフラン（THF）中で加熱したところ 1



時間で完全に溶解し、続いて溶媒キャストによってフィルムを再成形することができました（図4）。再成形されたフィルムの修復率はリサイクル操作の前後で同程度の値を示したことから、修復性能が劣化したフィルムをリサイクルすることによって性能を回復できることがわかりました。

本研究グループは、PDTU の自己修復性や易リサイクル性だけでなく、光学特性についても評価しました。PDTU は、分子内の硫黄含有率が 30%を超えることに起因して、おおよそ 1.655 の屈折率を示し、そのアッペ数は 25.5～27.7 となることがわかりました。これらの値は、高屈折レンズ材料として普及しているチオウレア樹脂やエピスルフィド樹脂に匹敵することから、PDTU は高屈折率および高アッペ数の樹脂であることがわかりました。

<今後の展望>

本研究グループは、ポリジチオウレタンが可逆的な付加－解離反応に基づく易リサイクル性、組み換え変え可能な弱い分子間水素結合に基づく自己修復性、高い硫黄含有率に基づく高屈折率を示すことを見だし、自己修復とリサイクルがともに可能な光学樹脂の開発に成功しました。また、この成果は、細かい傷が自然に修復する保護フィルムや廃レンズのケミカルリサイクルなどを志向するレンズ材料を開発するための新しい設計指針を示した点で意義深いと言えます。

今後、無溶剤や無触媒などのグリーンケミストリーに基づく条件で PDTU フィルムを成形およびリサイクルする技術を開発し、PDTU の製造からリサイクルまでを一貫して低環境負荷なプロセスで達成できれば、「傷ついても修復し、壊れても再生できる材料」として脱炭素社会や循環経済の構築に貢献できるものと期待されます。