

## 超分子材料設計学により 生体系を超える 材料構築を目指す

切断しても、また元に戻る高分子材料。

光の当て方によって右に曲がったり左に曲がったりする高分子材料。

高島義徳さんは、そんな新しい材料の開発を目指している。

それが世の中でいったいどう役に立つのか。

基礎研究で出口を求めすぎるのはいけないことかもしれないが、

やはり気になるのはそのこと。高島さんはその疑問にもきちんと答えてくれた。

大阪大学大学院理学研究科  
高分子科学専攻 講師

### 高島義徳

[たかしま・よしのり]

1974年生まれ。京都工芸繊維大学 繊維学部高分子学科卒。大阪大学大学院博士課程修了(理学研究科高分子科学専攻)、日本学術振興会特別研究員、大阪大学大学院理学研究科高分子科学専攻助教などを経て2016年7月より現職。2014年には文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞している。大学生のときはアイスホッケーをしていたが「今は体力に自信がありません。最近は階段がしんどい」とこぼす。

「第33回松籟科学技術振興財団研究助成 受賞」

## 高分子材料は意外にもろい

—事前に資料を読ませていただきましたが、非常に難しい内容で……。

先生が研究されていることを分かりやすくご説明いただけますか。

分かりました。バックグラウンド的なことも含めてお話ししましょう。

可逆的な結合を利用して、どこまで超分子材料を作製し、機能化できるか、というのが私の研究テーマです。

高分子材料は丈夫なものと思われていますが、意外にもろいところがあります。実際、試験機を使って一般的な高分子材料を上下に引っ張ると、すぐに切れてしまいます。ところが世の中は、もっと高強度な高分子材料を求めています。高強度で、引っ張ったときはある程度伸びて欲しいとかずいぶん難しい要求が私たち研究者に突き付けられています。割れてもまたくっついて欲しいという要望もあります。

—それはずいぶん無茶な要求ですね。

割れてもまたくっつく材料なんて、あるわけがないのに。

それがそうでもないんです。一般

的に強度と伸びはトレードオフのような関係にあり、強度が増すと伸びにくくなります。ところが私たちが合成した高分子材料は、強度は一般の高分子材料と同程度なのに、引っ張ってもなかなか切れません。しかも自己修復の機能も示しているのです。

—自己修復というのは、切れてもまたくっつくということですか。

そうです。(画像を映し出して) ちょっとこれを見てください。高分子材料が再接着できるかという実験で、寒天のような樹脂を釣り糸で切っているところです。もちろん普通の高分子材料は一度切ったら、再接着するようなことはありません。しかし透明性の高い私たちの材料は、少し切りにくいのですが、切ってもまたくっつくのです。再接着した後、強度的に元に戻る材料もあります。透明性を高くすると強度を100%戻すのは難しいですが、今学生が実験している材料は70%から80%くらい、強度が戻ります。なぜこういう現象が起きるのか、界面で分子は何をしているのか。そこはなかなか難しいのですが、非常に興味深い現象です。

## ケミカルとフィジカルの自己修復

—本当に不思議ですね。


私たちの生体を考えたとき、すべてが共有結合でつくられているわけではありません。非共有結合を駆使して、複雑な組織体は構築されています。そこで、非共有結合で超分子の材料をつくと、未知の領域のところに飛躍的な革新が可能になるのではないか。革新的な超分子材料ができるのではないかと考えています。

—資料には「生体系を超える材料構築」とありますが、生体系を超えるというのはどういうことですか。

単純に言えば、生体系にはない材料機能を目指すということです。切った材料が再接着するというのは、界面の分子認識に基づいていると考えられます。分子が相互にパートナーを認識してくっつくということです。接着という現象が、生体系でないわけではありません。傷口が治癒してくっついていく状態は、接着という現象に似ています。細胞と細胞は、自己と他者、自己と自己を認識しながら組織体を形成し、それが臓


超分子ヒドロゲルの接着性および自己修復率

2 wt% sol.  
(pH 9 buffer)




+

2 wt% sol.  
(pH 9 buffer)




→

2 wt% hydrogel




→




→

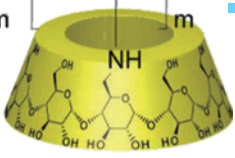
r.t., 1 day



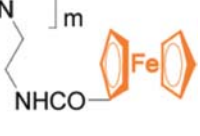
→

**Adhesion!**  
Recovery; 84%  
of the initial  
gel's strength

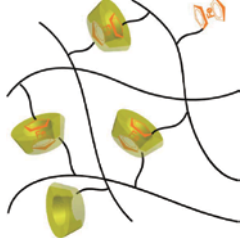


$$\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ | \\ \text{C}=\text{O} \\ | \\ \text{OH} \end{array} \right]_{n-m} \text{r} \left[ \begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ | \\ \text{C}=\text{O} \\ | \\ \text{NH} \end{array} \right]_m$$


+

$$\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ | \\ \text{C}=\text{O} \\ | \\ \text{OH} \end{array} \right]_{n-m} \text{r} \left[ \begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ | \\ \text{C}=\text{O} \\ | \\ \text{NH} \\ | \\ \text{NHCO} \end{array} \right]_m$$


→



自己修復性超分子ヒドロゲルは通常の高分子と異なり、可逆的な非共有結合にて架橋されており、切断されても錯体形成を通じた再接着性を示す。

7

器となって機能を生み出していく。そう考えれば、高分子の接着という現象も、新たな機能を生み出していくことができるかもしれません。

超分子科学の力で、集合体としての機能を生み出すようなことができれば、面白いと思います。もちろんそれをすぐそのまま社会実装するというものではありませんが。

## 新しい材料の起源をつくりだす

——自己修復の機能などは当初から予想されていたのですか。

いろいろトライ＆エラーする過程で偶然見つけた要素が大きいですね。最初から自己修復材料をつくらうと研究を始めたわけではありません。大学院生のとき、研究室の先生から「超分子は自己修復材料になる」と言われたときは、まったくイメージができませんでした。超分子をどう材料化するのか、想像すらできませんでした。

でもそのとき先生にシクロデキストリン（CD）というものを教えていただきました。CDには、水中で空孔サイズに応じた疎水性ゲスト分子を包接するという特徴があります。バケツ状の構造をしていて、疎水性の分子をはめ込む機能があるのです。サイズが変化するので、それに応じた分子が中に入ることができます。そのCDを使って、可逆的な結合や可動性の架橋といったツールを使えば、いろいろな材料が作りだせるのではないかと。そこで生み出される機能に自己修復性とか選択的接着もある。そこから新しい材料の起源をつくりだそうと今、考えています。

——ここまでの話を伺っていると、自己修復性の機能などを持つ材料はすでにある程度、できているよう

ですね。

2つの高分子溶液を混ぜると粘度が上がるといった現象があります。ゾル-ゲルスイッチと呼ばれる現象で、そこから自己修復につながるのではないかとという発想がとっかかりになりました。固まっているゲル内部で分子はじっとしているのではなく、自由に動いているのではないかと考え、CDと親和性の高いフェロセンという分子を使って実験しました。すると確かに自己修復性の機能が確認できました。化学的な自己修復と物理的な自己修復をつなぎ合わせた自己修復が達成できたのです。その論文は5年前になりますが、イギリスの「Nature Communications」という科学誌に掲載されました。

さらに今年に入り、可逆的な結合と可動性を持った架橋点を持つ自然界にもない自己修復システムとして、アメリカのセル出版が発行している「Chem」(ケム)という化学誌に研究を発表しました。

## 人工筋肉が作れる可能性も

——基礎的な研究に性急に出口を求めるとはよくない風潮だと最近、よく言われます。しかし、門外漢の素人には、最終的にどのような成果物が得られるのか、イメージできないと研究の意義がよく理解できません。だからあえてお聞きしますが、先生の研究は最終的にどのような成果物を私たちにもたらすのでしょうか。

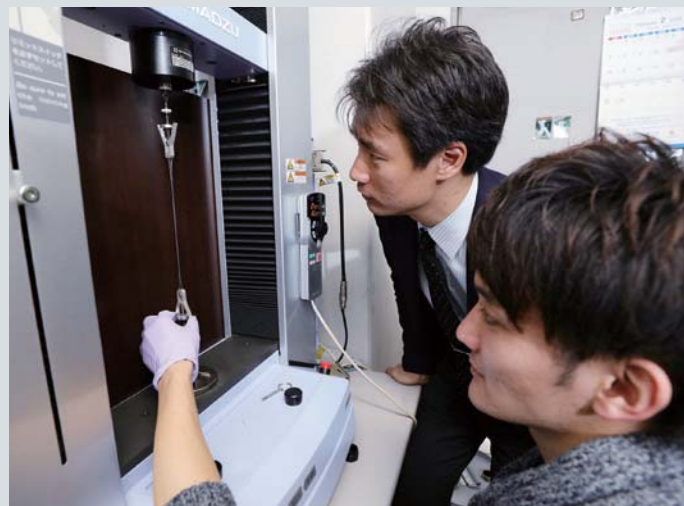
異種材料の接着のところに可逆的な結合のアイデアを入れると、自己修復性の機能を持つ接着剤のようなものができるかもしれません。たとえば

自動車の製造現場では、金属とプラスチックの接合が重要な課題になっています。軽量化したいため、リベットを使わず接着剤で接合する研究も進められています。しかし、日光を浴びるとプラスチックが膨張し、冷えると収縮し、割れてしまうことがあります。その点、私たちが開発した材料はたとえ膨潤して割れても、別のところで安定した結合状態を探し出して接着を維持できる可能性があります。もうひとつ、もっと分かりやすい例をお話ししましょう。

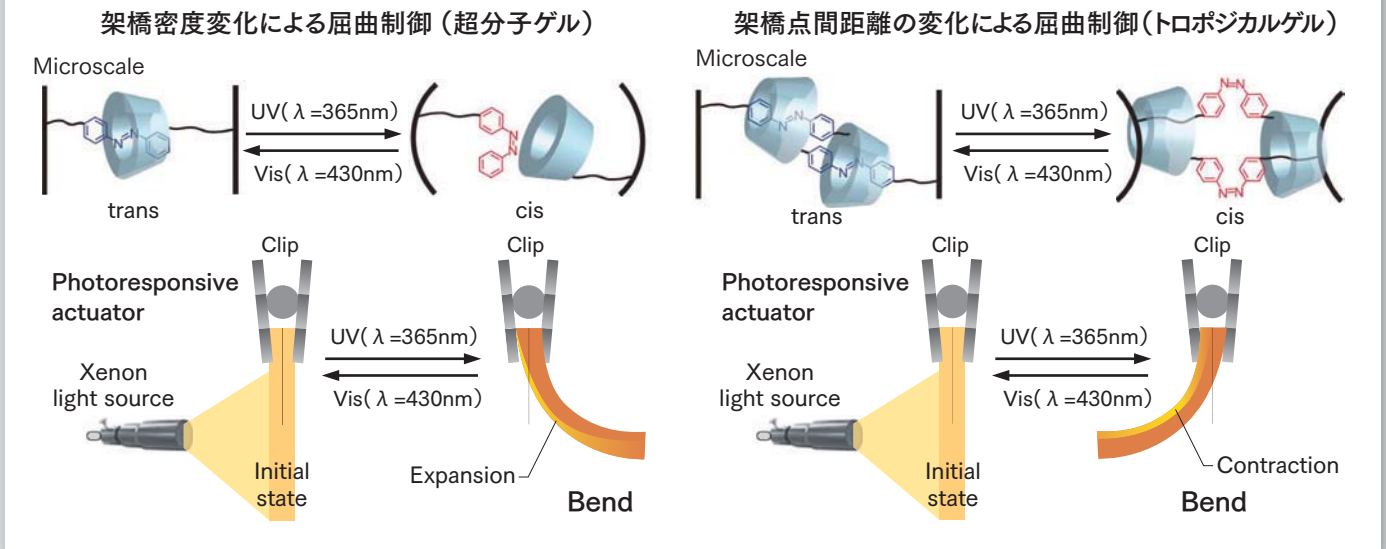
——ぜひ、お願いします。

光刺激応答性超分子アクチュエータの分子設計についてです。光に回答する高分子材料で、水中で光を当てると、入射方向に応じて屈曲します。右に曲がったり左に曲がったり元に戻ったりするわけです。これは学生が実験しているときに偶然見つけたもので、ソフトアクチュエータのようなものにつながるのではないかと考えています。ひも状の分子の上をリング状の分子が滑り動くような構造にしたことで、動く速度も速くなりました。

これを人工筋肉のようにして、医療用の材料に応用することも期待できます。また、現状のパワードスーツはシリンダーや金属でできていま



## 光刺激応答性超分子材料の分子設計アプローチ



材料設計に分子の可逆的な結合と可動性の架橋を駆使することで、逆の応答性を観察できる。

すが、重量や硬さなどの点で人間が実装するにはいずれ限界がくると思います。こういうソフトな材料をパワースーツに使うことも考えられるのではないのでしょうか。有機ELなどを使えば省電力で動かせるようになり、バッテリーも小型化できるでしょう。ゲル状の材料として止血シートにも使えるかもしれませんね。

### あの悔しさは忘れない

——研究で行き詰まったときはどう対処されていますか。

ひたすら研究するしかないのでは……。行き詰まって自分が諦めてしまい、同じ研究で他の人が成功したときのあの悔しさはありませんから。「視点を変える」ということはよく言われることですが、逃げずに、怯まず努力するということが必要だと考えています。

——そういう経験があるのですか。

もちろん。自己修復材料の研究では、自分もたまたましているときフランスの研究者に抜かれてしまったことがありました。私たちは完璧に

うまくいくような凝った分子設計をしていましたが、その研究者はとてもシンプルな分子を設計していました。やられたなと思いました。その研究者は高分子物理が専門なので、簡単な分子設計で要点を押さえればいいと考えていたのでしょう。重要なポイントは、可逆的な結合で自己修復が達成できるかどうかということなので、分子にこだわりすぎるのはよくないなと反省しました。

——今後の目標をお聞かせください。

共有結合性材料の限界を超えることですね。いろいろなアプローチがあると思いますが、材料自身が意思を持つ、機能を生み出すというところがいいかもしれません。新たな価値観を創造するために、私の場合は高分子科学から挑戦していると思います。

——毎日、どのように過ごされているのですか。

講義もしていますが、私自身は毎日研究を楽しんでいます。自分で体を動かすことは少なくなりましたが、実験をしている学生たちとは毎日2



トポジカルゲルにLED光を照射することで、生き物のように動く様子を観察できる。

時間くらいディスカッションしています。いろいろ共同研究などもしているので日中はメールが多く、なかなか書き物ができません。そのため最近では夜遅くまで大学にいたことが多くなっています。夕方の6時頃になるとメールがピタッと来なくなるので、夜の8時、9時頃から書き物をするのですが、思考をめぐらすといってもその頃にはもうあまり体力が残ってなくて。そうするとだんだん帰宅するのが面倒になり、つい研究室に泊まることもあります。

休日は共同研究の案件などで東京に行くことが多く、最近ではスカイプで2人の子どもと会話をしていたりします。いろいろ大変なこともありますが、好きでやっていることですから全然苦にはなりません。