



北海道大学総務企画部広報課  
〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目  
TEL: 011-706-2610 FAX: 011-706-2092  
E-mail: kouhou@jimuhokudai.ac.jp  
URL: <http://www.hokudai.ac.jp>

科学技術振興機構(JST)広報課  
〒102-8666 東京都千代田区四番町 5-3  
TEL: 03-5214-8404 FAX: 03-5214-8432  
URL: <http://www.jst.go.jp>

内閣府政策統括官(科学技術・イノベーション担当)  
〒100-8914 東京都千代田区永田町 1-6-1  
TEL: 03-6257-1339 FAX: 03-3581-9288  
URL: <http://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/about-kakushin.html>

## 金属よりも丈夫な柔軟複合材料「繊維強化ゲル」を開発

### 研究成果のポイント

- ・繊維とゲルとの複合により、金属よりもタフ（丈夫）な「繊維強化ゲル」を創出。
- ・本繊維強化ゲルのタフネスは、繊維織物単体の 25 倍、ゲル単体の 100 倍の値であり、両者の相乗効果によって強靱化したことを示している。
- ・繊維強化ゲルのタフネスは、ゲルのタフネスと連動して増大する。このことから、超強靱化は、繊維とゲル間及びゲル内部に存在する多量のイオン結合に起因していると推定。
- ・ゲルの代わりにゴムを用いることにより、強靱な繊維強化ゴムも開発可能。
- ・本繊維強化ゲルは、高信頼性・高耐久性の柔軟材料として、生体組織の代替材料や工業用材料などへの適用が期待される。

### 研究成果の概要

内閣府 総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の伊藤耕三プログラム・マネージャーの研究開発プログラムの一環として、北海道大学大学院先端生命科学研究所の龔（グン）教授らのグループは、水を大量に含んだゼリー状の材料であるハイドロゲル<sup>(注1)</sup>をガラス繊維<sup>(注2)</sup>の織物と複合させることによって、丈夫さを誇る「繊維強化ゲル」の創製に成功しました。繊維強化ゲルは、曲げやすい柔軟な材料であるにもかかわらず、金属をも凌駕する強靱性を有しています。繊維強化ゲルのタフネス（破壊に必要なエネルギー）は、ゲル単体の 100 倍、織物単体の 25 倍にもなり、両者の性質の相乗効果によって極めて強靱化しています。また、複合にゲルではなくゴムを用いることで、強靱な繊維強化ゴムを合成することも可能です。得られた材料は、超強靱なゲルシートとして生体材料や服飾用途への利用が可能と期待されます。本成果は、「柔軟な複合材料<sup>(注3)</sup>」という新規材料分野の開拓につながるものです。

## 論文発表の概要

研究論文名：Energy-Dissipative Matrices Enable Synergistic Toughening in Fabric Reinforced Soft Composites（エネルギー散逸能を有するマトリックスは、繊維強化柔軟材料を相乗的に強靱化する）

著者：黄 以万<sup>1</sup>, Daniel R. King<sup>2,3</sup>, 孫 桃林<sup>2,3</sup>, 野々山 貴行<sup>2,3</sup>, 黒川 孝幸<sup>2,3</sup>, 中島 祐<sup>2,3</sup>, 龔 劍萍<sup>2,3</sup>（<sup>1</sup> 北海道大学大学院生命科学院, <sup>2</sup> 北海道大学大学院先端生命科学研究院, <sup>3</sup> 北海道大学国際連携研究教育局）

公表雑誌：Advanced Functional Materials（最新の機能材料を紹介する雑誌）

公表日：日本時間（現地時間） 2017 年 1 月 16 日（月）午後 10 時（ドイツ時間 2017 年 1 月 16 日（月）午後 2 時）

## 研究成果の概要

### （背景）

昨今、環境や社会に優しい材料の創出に向けて様々な取り組みが行われています。中でも、多種の素材を組み合わせ得られる複合材料は、互いの長所を併せ持つ優れた材料として期待されています。例えば、軽量のプラスチックを引っ張りに強いガラス繊維や炭素繊維と複合させることで、繊維強化プラスチック（FRP）を得ることが出来ます。FRP は、プラスチックの軽量さ、しなやかさと繊維の硬さ、強さを併せ持った、軽くて丈夫な材料であり、金属に代わる次世代の構造材料として大きな期待を寄せられています。スポーツ用品、船体、自動車部品などのほか、近年では飛行機の主翼にも使用されており、これによって飛行機の軽量化と燃費の大幅な向上が実現されました。

一方、ハイドロゲルは網目状につながったポリマーが多量の水を含んだ、ゼリー状の物質です。われわれ人間のからだは 60%が水で構成されていることから、水を含んだ材料であるハイドロゲルは生体となじみが良い材料として特に医療面から期待されており、人工組織、再生医療の基材など医療材料としての用途が広く検討されています。また、ハイドロゲルはその大部分が水であり、資源の面から環境に優しい材料でもあります。しかし、従来のハイドロゲルは水を大量に含んでいるためにもろく、実際の材料としての使用は（コンタクトレンズなどごく限られたものを除き）困難でした。本問題を解決するために、大量の水を含みながらも丈夫なハイドロゲルの開発が世界的に進められています。この分野では日本が世界をリードしており、これまでに、東京大学の伊藤らによる環動ゲル<sup>（注4）</sup>、川村理化学研究所の原口（当時。現：日本大学）らによるナノコンポジットゲル<sup>（注5）</sup>、北海道大学の龔らによるダブルネットワークゲル<sup>（注6）</sup>・ポリアンフォライトゲルなどが開発されています。特にポリアンフォライトゲル(PA)ゲルは、負電荷を有するモノマーと正電荷を有するモノマーを 1 : 1 で共重合させて得られるゲルであり、内部に多量のイオン結合<sup>（注7）</sup>を有することで、強靱性、自己修復性、生体やガラスとの接着性などを有する優れた材料となっています。しかし、これら高強度ゲルの研究は着実に進歩しているものの、構造材料として長期間使用できるほどの信頼性を備えるゲルは未だに開発されていません。

### （研究手法・研究成果）

龔教授らのグループは、新たなハイドロゲルの強靱化手法として繊維強化プラスチックの手法に着目し、ゲルと繊維の複合による強靱化に挑戦しました。その中で、ゲルマトリックスとして上記のポリアンフォライト(PA)ゲル、強化材として直径 10  $\mu\text{m}$  程度のガラス繊維からなる織物を用いた場合に、

未だかつてないほど丈夫な柔軟材料「繊維強化ゲル」を得ることが出来ました（図上）。この繊維強化ゲルは、ガラス繊維の織物をゲル化溶液に含浸させ、重合するというシンプルな合成法で得ることが可能であり、合成に複雑なプロセスを必要としません。本材料は、自由に曲げられることの出来る柔軟性を保ちつつ、引裂破壊エネルギー<sup>（注8）</sup> 500 kJ/m<sup>2</sup> という驚異的な超強靱性を有しています。これは、強靱な固体として知られる炭素鋼（破壊エネルギー 1-100kJ/m<sup>2</sup> 程度）やガラス繊維強化プラスチック（破壊エネルギー 10kJ/m<sup>2</sup> 程度）を凌駕するものです<sup>（注9）</sup>。繊維強化ゲルの引裂破壊エネルギーは、ガラス繊維織物単体の引裂破壊エネルギー20 kJ/m<sup>2</sup>と比較しておよそ 25 倍、PA ゲル単体の 4 kJ/m<sup>2</sup>に対して 100 倍もの値であり、繊維強化ゲルが単なる両成分の足し合わせではなく、両者の相乗効果によって強靱化していることが分かります（図左下）。特筆すべき点として、本繊維強化ゲルはこれほどの強靱性を、体積比にして 40%もの水を含みながら実現しています。

本繊維強化ゲルの超強靱化メカニズムには、PA ゲルの特徴であるイオン結合が大きくかかわっています（図右下）。繊維強化ゲルを電子顕微鏡で観察すると、PA ゲルとガラス繊維が複合ゲル内部で強く粘着していることが分かりました。これは、ガラス繊維表面の負電荷と PA ゲル内部の正電荷がイオン性相互作用を形成したためと考えられます。また、先に述べたように PA ゲル自身も多量のイオン結合を含んでいます。このような繊維強化ゲルに亀裂を進めようとする、亀裂の周辺においてゲルが大きく変形し、またガラス繊維がゲルから引き抜かれます。この際、極めて多量のイオン結合を壊す必要があるため、繊維強化ゲルの破壊には極めて大きなエネルギーが必要になる（すなわち、タフになる）のです。この強靱化メカニズム仮説を補強するものとして、PA ゲル内部のイオン結合強度を調整すると、ゲルのタフネスと繊維強化ゲルのタフネスが連動して変化するという実験結果が得られています。

この繊維強化ゲルのメカニズムを応用し、ゴムとガラス繊維を複合させることによって、強靱な繊維強化ゴムを作成することも可能になると期待されます。予備的に、シリコーンゴムとガラス繊維織物を複合させたところ、引裂破壊エネルギー200 kJ/m<sup>2</sup>を有する強靱な繊維強化ゴムを得ることが出来ました。

#### （今後への期待）

「繊維強化ゲル」は、高い柔軟性を保ちつつも金属を凌駕するほどの強靱性を有している、かつてない性質を有する材料です。また本ゲルには水が 40%も含まれていることから、省資源の面からも注目すべき材料であると言えます。本材料は、高信頼性・耐久性の柔軟材料として多様な応用が期待されています。例えば、人工靱帯・腱など、極めて強い力が掛かる生体組織の代替材料、丈夫な柔軟シートとしての服飾、工業用材料などの用途が考えられます。本研究で発見した「繊維強化ゲル」の高靱性原理をゴムなど他のソフトマテリアルに適用することで、既存のゴムを凌駕するしなやかでタフな材料創製が期待できます。

#### お問い合わせ先

##### ＜研究に関すること＞

北海道大学大学院先端生命科学研究院

教授 龔 劍萍（グン チェンビン）

〒001-0021 札幌市北区北 21 条西 11 丁目

Tel : 011-706-9011 E-mail : gong@sci.hokudai.ac.jp

ホームページ : <http://altair.sci.hokudai.ac.jp/g2/>

＜ImPACT 事業に関すること＞

内閣府 革新的研究開発推進プログラム担当室

〒100-8914 東京都千代田区永田町 1-6-1

Tel : 03-6257-1339 Fax : 03-3581-9288

＜ImPACT プログラム内容及び PM に関すること＞

科学技術振興機構 革新的研究開発推進室

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7K's 五番町

Tel : 03-6380-9012 Fax : 03-6380-8263 E-mail: impact@jst.go.jp

＜報道担当＞

北海道大学 総務企画部広報課

〒060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目

Tel : 011-706-2610 Fax : 011-706-2092 E-mail: kouhou@jimuhokudai.ac.jp

科学技術振興機構 総務部広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町 5 番地 3

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432 E-mail: jstkoho@jst.go.jp

＜用語解説・引用＞

（注 1）ハイドロゲル：網目状の高分子の内部に水を含んだ材料のこと。身近な例で言うと、ゼリー、こんにゃく、ソフトコンタクトレンズなどはハイドロゲルである。

（注 2）ガラス繊維：ガラスを細い繊維状にしたもので、グラスファイバーとも呼ばれる。そのまま断熱材やフィルターとして使われるほか、プラスチックと混合することで、丈夫な繊維強化プラスチックを得ることが出来る。

（注 3）複合材料：2 種類以上の素材を組み合わせることで、単一の素材では実現出来ない特性を持った材料のこと。複合材料の代表例である鉄筋コンクリートは、引っ張りに強い鉄筋と、圧縮に強いコンクリートを組み合わせることで、引っ張りにも圧縮にも耐えられる丈夫さを持っている。

（注 4）環動ゲル：滑車のように動く分子によって高分子を架橋した丈夫なゲル。滑車のすべり効果によりゲルに加わった力を分散させることが出来る。

（注 5）ナノコンポジットゲル：水に溶ける高分子を、クレイ（粘土の微粒子）によって架橋して得られた丈夫なゲル。高分子とクレイとの吸着によって高い強度を示す。

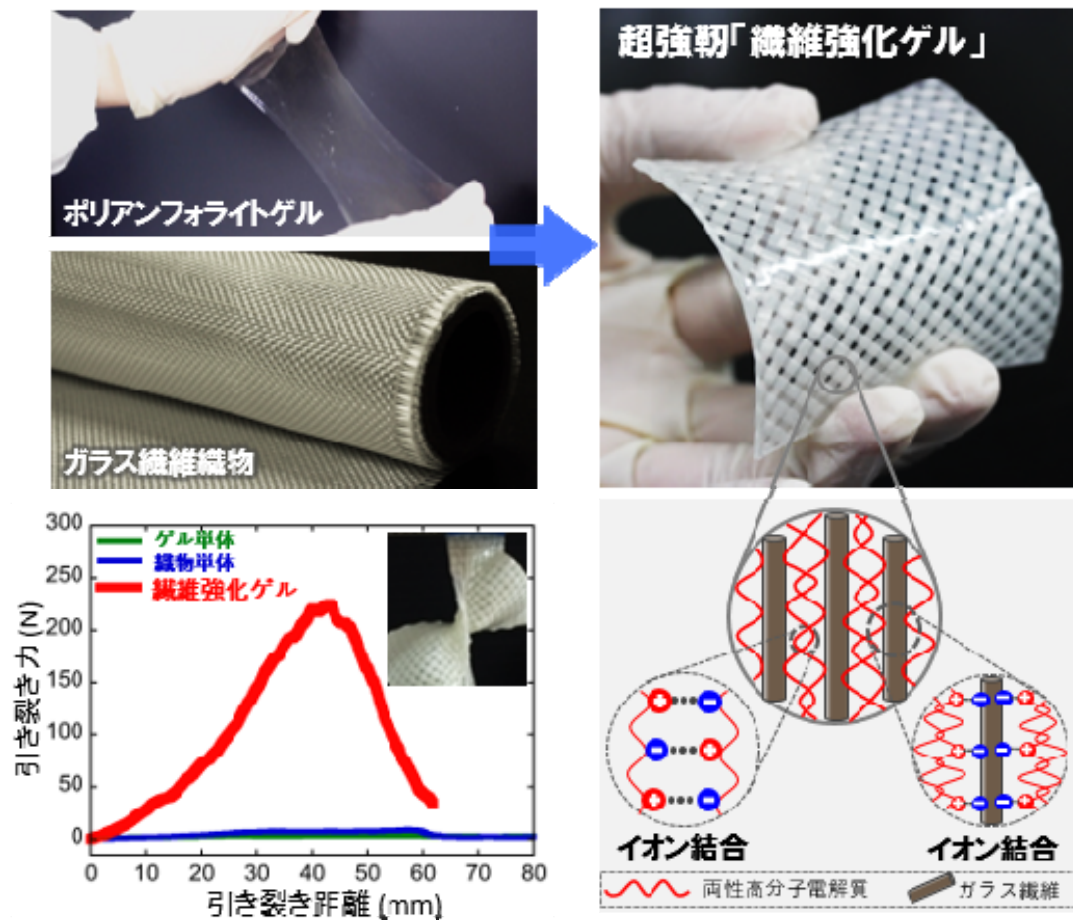
（注 6）ダブルネットワークゲル：もろい高分子網目と柔軟な高分子網目を複合させることで得られた丈夫なゲル。2 重網目構造が効率的に力の集中を防ぐため、極めて壊れにくいゲルとなっている。

（注 7）イオン結合：+の電荷（イオン）と-の電荷との間の引力による結合。例えば、食塩の中でナトリウムと塩化物イオンを結び付けているのはイオン結合である。

（注 8）引裂破壊エネルギー：材料を引き裂き、1 平方メートルの破断面を形成させるのに必要なエネルギー。材料の壊れにくさ（丈夫さ、タフネス）の指標としてよく用いられる。

（注 9）炭素鋼とガラス繊維強化プラスチックの破壊エネルギーの値は、Michael F. Ashby 著 “Materials Selection in Mechanical Design, 3rd Edition”（エルゼビア社）より引用。

<参考図>



図：(上) ポリアンフォライト (PA) ゲル及びガラス繊維織物を複合させることで、柔軟で超強靱な繊維強化ゲルが得られる。(左下) 繊維強化ゲルの引裂試験結果。繊維強化ゲルの引裂には、単体のゲルや織物よりもはるかに大きな力・エネルギーが必要になる。(右下) 繊維強化ゲルでは、ゲル—繊維間及びゲル内部に多くのイオン結合が存在しており、これらが複合材料の強靱性を大きく向上させている。