

2024 年 10 月 11 日

国立大学法人東北大学
国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）

**体温付近で接着力が 1000 倍変化する
脱着可能な水中接着剤を開発**
— ムール貝からヒントを得た接着メカニズム —

【発表のポイント】

- ムール貝からヒントを得て、水中で接着可能なハイドロゲル接着剤を開発しました。
- 体温付近で性質が変化する温度応答性をハイドロゲルに付与することで、接着力を 1000 倍以上の差で変化させ、体温以上で強く接着、体温以下で容易に剥離をすることが可能になりました。
- 医療デバイス等と組み合わせることで、必要に応じた生体シグナルの計測等を可能にします。

【概要】

水中で使える接着剤は、生体環境のような濡れた表面へ材料を結合することを可能にし、医療機器の生体表面への接着や止血などに役立ちます。特に、健康状態のモニタリングや電気を使った治療、薬の投与などにおいては、生体電子機器（バイオエレクトロニクス）と生体組織の間に安定した接続を持つことが重要となってきます。一方、強すぎる水中接着剤は、剥離の際に生体組織も傷つける可能性を含むため、湿った環境で強い接着を保ちながらも、容易に取り外せることが重要です。

東北大学学際科学フロンティア研究所（大学院工学研究科 兼任）の阿部博弥准教授のグループは、ムール貝の足（足糸）^{（注1）}が有する水中接着性に着想した水中接着剤に温度応答性を付与することで、体温以上では強固に接着し、体温より低い温度では容易に剥離する脱着可能な水中接着剤を開発しました。本研究で開発した“温度で接着性を制御可能な水中接着剤”は、生体医療機器を人体に安全に取り付けることができ、また取り外す際の皮膚へのダメージを最小限に抑えることを可能にするため、実用化に期待がかかります。

本成果は 2024 年 10 月 11 日に、材料科学分野の専門誌「NPG Asia Materials」にオンラインにて公開されます。

研究の背景

医療機器は人体内の湿気にさらされるため、それに適した水中接着剤が必要です。安定した接着には湿った表面への強い接着力が求められますが、一般的な接着剤では湿った環境では強い接着力を発揮することができません。さらに、強い水中接着剤が実現し、安定した接続が可能になったとしても、取り外す際に組織やデバイスを傷つける可能性があります。したがって、湿った環境で強い接着機能を保ちながらも、容易に取り外せることが重要です。

今回の取り組み

自然界にはフジツボやタコなどの優れた水中接着性を持つ生物が存在しており、生物からヒントを得た接着剤は医療や産業で大いに役立つ可能性を秘めています。ムール貝は足糸の接着タンパク質によって海中の様々な表面に強力に接着できる能力を持っています。このムール貝の足糸には「カテコール基」という化学構造が多く含まれており、これが水中での接着を可能にしています。また、ムール貝は岩盤などの無機物の表面に強く付着することができますが、外部から刺激を感じた時には素早く表面から離れることもできます。

研究グループは、ムール貝に着想を得た水中接着性ハイドロゲル^(注2)を設計し、さらに、温度応答性を付与することで脱着可能な水中接着剤を開発しました（図1）。この水中接着剤は体温で接着性を切り替えることが可能で、体温以上で強く接着し、低い温度で容易に取り外せる特性を持っています。

今回作製した水中接着性ハイドロゲルは、カテコール基を有するドーパミン^(注3)と温度応答性高分子^(注4)から構成されています（図2）。この水中接着性ハイドロゲルは、空気酸化による重合・架橋反応を用いて作製することで、片面が密に架橋されたタフゲル層と、もう片面が緩く架橋された接着層から構成される二面性（Janus 構造）を持ち合わせています（図3）。これにより、水中接着性ハイドロゲルは操作性と強い接着性の2つの特性を有することが可能となりました。

水中接着性ハイドロゲルと固体基板（ガラス、チタン、アルミニウムなど）の間の接着力は、体温以上の温度で 100 kPa（キロパスカル）^(注5)以上を示します。一方、体温以下の温度では、接着力が約 0.1 kPa まで大幅に低下するため、簡単に剥がすことができます。この結果により、1000 倍以上の接着力の差を温度によって制御できることを実証しました。温度による接着力の変化は、ブタの皮膚を使った実験でも確認できました（図4）。

水中での生体電気信号をモニタリングしたところ、市販のハイドロゲルはすぐに膨張して皮膚から剥がれ、連続的なモニタリングができませんでした。一方で、電極が埋め込まれた水中接着性ハイドロゲルは、人間の皮膚に体温以上の温度で貼り付けることができ、10 分間の連続的な電気信号のモニタリングが可能になりました（図5）。その後、室温まで冷やすことですぐに接着剤が生体表面から剥離することを確認しています。

今後の展開

今回作製した接着剤は、ムール貝の優れた水中接着性に加え、温度の外部刺激による水中接着性の制御を実現しました。この水中接着剤が有する 1000 倍以上の接着力の差は、デバイスと生体組織の安定した接合だけでなく、優しい剥離を可能にします。そのため、生体電気信号のモニタリングや、最小限の侵襲で行う創傷治癒などの医療用途に貢献することが期待されます。

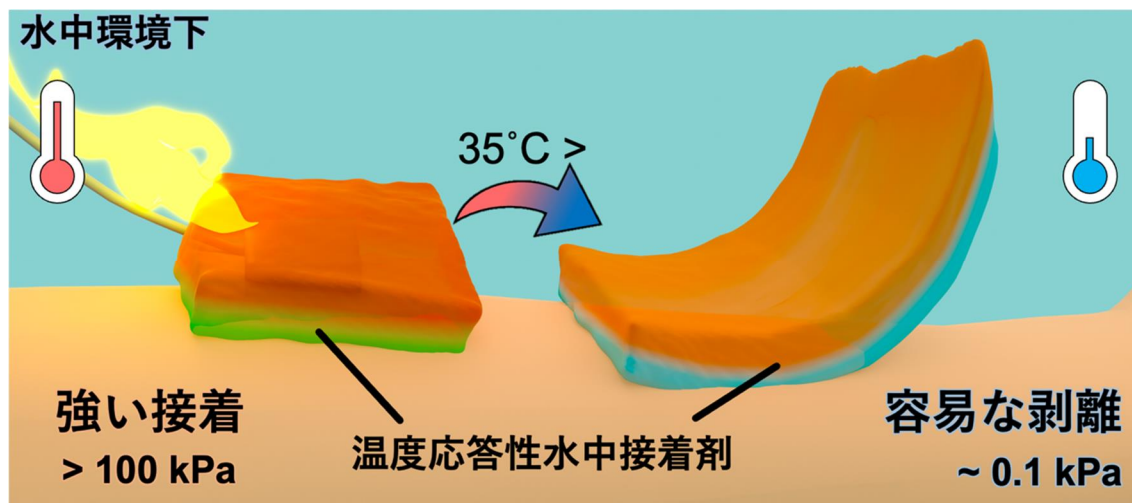


図 1. 体温付近で接着と脱離を制御可能な水中接着性ハイドロゲルを開発

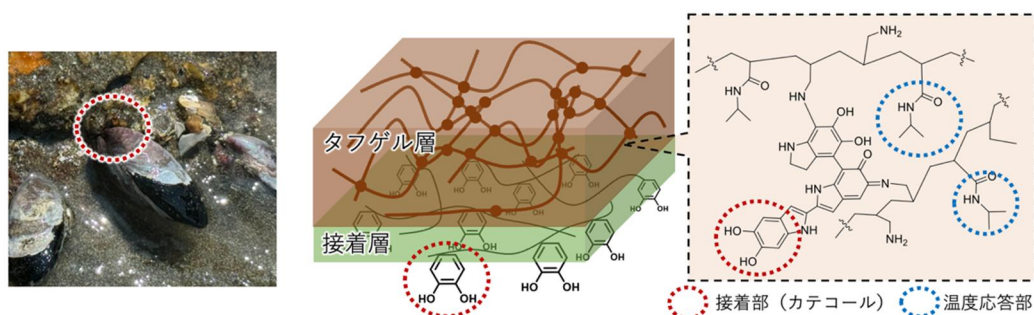


図 2. 設計した温度応答水中接着性ハイドロゲルの構造。本接着剤は、ムール貝と同じカテコール基を有する上に、温度応答性が付与されている。

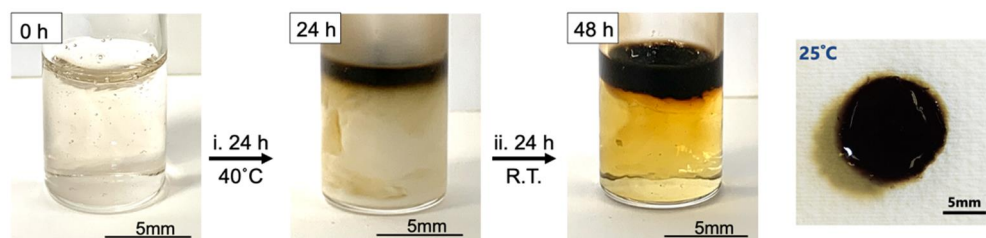


図 3. 空気酸化界面重合によるハイドロゲルの作製。空気と触れる上部のみ、ゲル化反応が進行する。

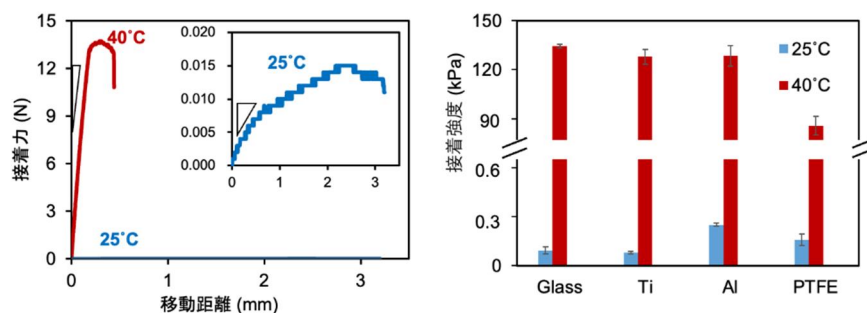


図 4. ガラス基板表面への本水中接着性ハイドロゲルの接着力試験。体温以上（40℃）で高い接着性を示す一方で、低温（25℃）では急激に接着性の低下が確認された。さまざまな基板に対しても同様の傾向が見られる。

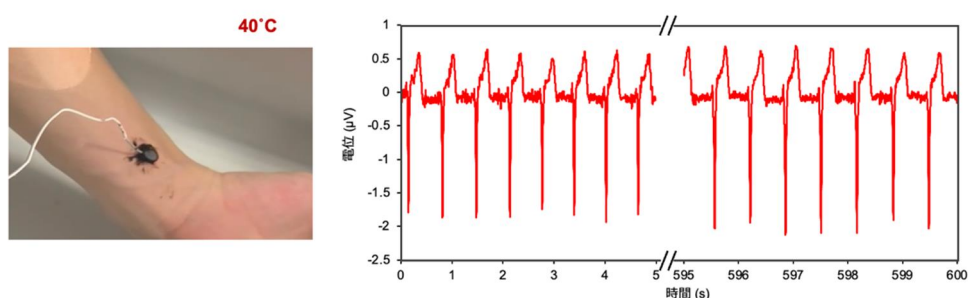


図 5. 電極を埋め込んだ温度応答-水中接着性ハイドロゲルを 40℃ の温水中に入れ、10 分以上安定して生体電位を計測できることを確認。

【謝辞】

本研究は、科学技術振興機構（JST） 戦略的創造研究推進事業 ACT-X「生体接着する生物模倣バイオセンサー」（JPMJAX22K1）、日本学術振興会科学研究費助成事業若手研究（22K14579）、学術変革 A（22H05397）の助成を受けたものです。

【用語説明】

注1. 足糸

ムール貝が岩やその他の硬い表面にしっかりと付着するために使う、糸状の構造物のことです。ムール貝の足の部分から分泌される特殊なタンパク質でできており、これが固まることで強力な接着力を発揮します。

注2. ハイドロゲル

水分を多量に含むことができる柔らかいゲル状の物質です。水を主体とした三次元の高分子ネットワークで構成されており、柔軟で弾力のある性質を持ちます。

注3. ドーパミン

カテコールアミンと呼ばれる分子の一種で、脳内のシグナル伝達を担う神経伝達物質の一種です。その一方で、分子構造内にカテコール基を有しているため、カテコール基を活かした材料としても注目されています。

注4. 温度応答性高分子

温度応答性高分子は、温度変化によって性質が変わる高分子です。本研究で使用している PNIPAm（ポリ(N-イソプロピルアクリルアミド)）は、体温付近でハイドロゲルの性質が変化し、32℃以下で親水性（柔らかいハイドロゲル）、32℃以上で疎水性（硬いハイドロゲル）になる性質を持ちます。この特性を利用し、温度に応じた接着性の制御を実現しています。

注5. キロパスカル

圧力を示す単位です。100 kPa では、1 平方センチに 1kg 重の力がかった状態を示します。

【論文情報】

タイトル： Mussel-Inspired Thermo-Switchable Underwater Adhesive based on a Janus Hydrogel

著者： Hiroya Abe*, Daichi Yoshihara, Soichiro Tottori, Matsuhiko Nishizawa

*責任著者： 東北大学学際科学フロンティア研究所（大学院工学研究科 兼務）

掲載誌： *NPG Asia Materials*

DOI： 10.1038/s41427-024-00569-1

URL： <https://www.nature.com/articles/s41427-024-00569-1>

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

国立大学法人東北大学学際科学フロンティア研究所・大学院工学
研究科

准教授 阿部博弥

TEL: 022-795-6167 Email: hiroya.abe.c4@tohoku.ac.jp

（JST 事業に関すること）

国立研究開発法人科学技術振興機構 戦略研究推進部 先進融合研究
グループ

原田千夏子

TEL: 03-6380-9130 Email: act-x@jst.go.jp

（報道に関すること）

国立大学法人東北大学学際科学フロンティア研究所 企画部

特任講師 児山洋平

TEL: 022-795-4353 Email: yohei.koyama.e2@tohoku.ac.jp

国立研究開発法人科学技術振興機構 広報課

TEL: 03-5214-8404 Email: jstkoho@jst.go.jp