



令和7年7月22日

「やわらかい電気」で色が変わる
～電子デバイスへ利用可能な新フレキシブル電子材料の開発～

【概要】

奈良女子大学大学院工学系の大背戸豊准教授（工学部担当）と生活環境学部情報環境学科環境学コース4回生(当時、現卒業生)の江口莉理さんによる研究の成果として、電気を加えることで色が変化する「エレクトロクロミックデバイス」に応用可能な新しいレドックスヒドロゲル材料が開発されました。本研究では、従来、水に不溶なフェロセン分子を包接化合物として水溶化したものを、ポリビニルアルコールとホウ砂から成るヒドロゲルマトリックスに導入することにより、電気化学的に可逆な応答性と柔軟な加工性を兼ね備えたゲルを実現しました。今回の成果は、柔軟性と機能性を併せ持つ材料の開発という観点から、今後のフレキシブルエレクトロニクスやウェアラブルデバイスなどの次世代電子デバイスの進展に資するものです。

なお、本研究成果は、英国王立化学協会 の材料化学系学術誌 *Journal of Materials Chemistry C* 電子版に2025年7月21日に公開されました。



図1 レドックスヒドロゲルのコンセプトと得られた結果

PRESS RELEASE

【研究の背景】

ポリビニルアルコール (PVA) は、水に溶ける高分子材料として古くから知られ、食品包装や医療用素材など多様な分野に応用されてきました。なかでも PVA をホウ砂 (ボラックス) と組み合わせて形成されるゲルは、簡便な調製法と柔らかな質感により、かつては「スライム」として親しまれていましたが、最近ではイオン導電性を活かしてバイオエレクトロニクスやエネルギーデバイスへの応用が進められつつあります。

また、材料に電圧をかけることで色調が可逆的に変化する「エレクトロクロミズム」は、スマートウィンドウや自動車の防眩ミラーなどの用途で実用化されており、近年ではより柔軟で生体適合性の高い材料を用いた新型デバイスの研究開発が活発化しています。従来、このような機能を持つ材料には、電解液や固体状薄膜などが使われてきましたが、それらは柔軟性に欠け、製造工程が複雑、溶媒揮発性が高いなどの課題を抱えていました。

一方、酸化還元反応を介して電気化学的に応答する有機金属錯体であるフェロセンは、エレクトロクロミック材料や電極修飾材料として長年にわたり広く研究されてきたものの、その疎水性のために水系での利用をはじめ、水系ゲル (ヒドロゲル) への直接導入は困難でした。この課題に対し、他の研究によりフェロセンを水溶性化合物 (ヒドロキシプロピル- β -シクロデキストリン、HP- β -CD) との包接化合物として安定化させる手法が報告されていたが、それを機能性ヒドロゲルに利用した事例はありませんでした。

【研究手法】

本研究では、フェロセンを水に溶ける形で利用するために、HP- β -CD との包接化合物の形成による水溶化を行い、これを PVA とボラックスによるゲルマトリックスに導入しました。フェロセン包接化合物の導入によって、PVA 鎖とボラックスに加えてシクロデキストリン由来の水酸基や空間構造がネットワーク形成に寄与し、新たな三次元網目構造を構築できると考えられました。合成された試料は、視覚的には軟らかく自己保持性があり、手で成形可能なゲル状物質として観察されましたが、これを定量的に評価するためにレオメータを用いて動的粘弾性測定を実施した結果、貯蔵弾性率が損失弾性率を上回る周波数領域が広く確認され、典型的なゲル状態を示す粘弾性応答が得られました。

さらに、電気化学的特性の評価にはサイクリックボルタンメトリー法を用い、酸化還元反応が水系環境下でも可逆的に進行するかを検証しました。特に電位掃引速度を変化させて測定したところ、低掃引速度条件下ではフェロセン特有の電流ピークが明瞭に観測され、水系ゲル内部においても包接されたフェロセ

PRESS RELEASE

ンがゲル中であっても電気化学的に機能していることが確認されました。このように得られたゲルはレドックスゲルであったので、これを基材として用い、エレクトロクロミック分子としてメチルビオロゲンを加え、二つの透明電極で挟み込んだ単層構造のエレクトロクロミックデバイスを試作し、電圧の印加によって色調が明瞭に変化する挙動を確認しました。これにより、本材料が電気応答性のマトリックスとして機能することが実証されました。

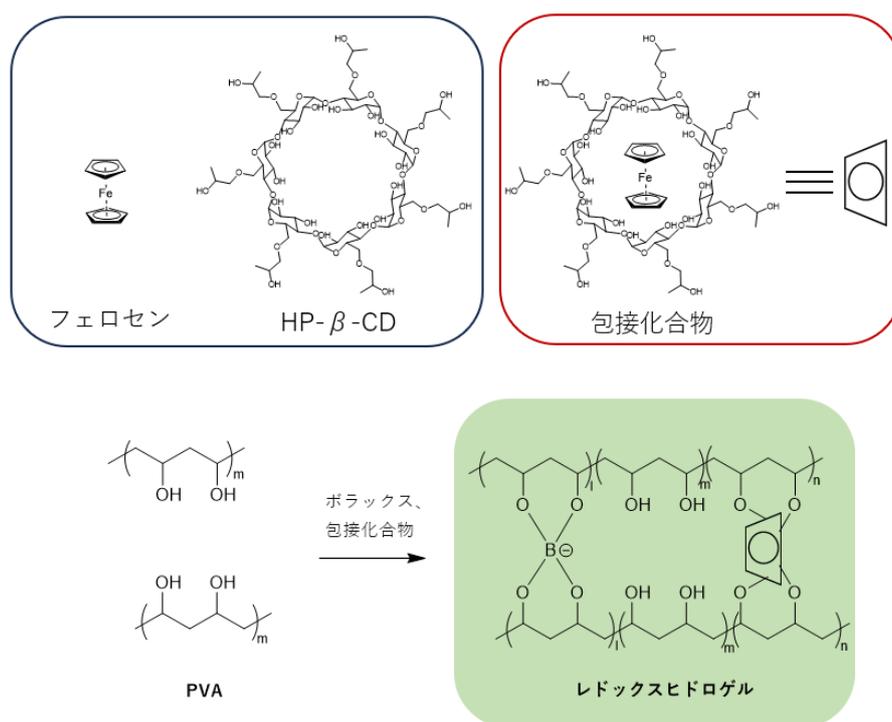


図2 レドックスヒドロゲルの合成

【研究成果】

得られたレドックスヒドロゲルは、化学的に安定な電気化学応答を示すとともに、柔軟な素材としての性質を保持していました。この材料は、従来型の液体電解質系とは異なり、ゲル状の物質でありながら優れた電荷輸送特性を備えており、デバイス構造の簡素化や柔軟性の付与を同時に実現しています。特に、色調変化を伴うデバイスへの適用においては、薄く柔軟なフィルム状で動作可能であり、スマートテキスタイルや曲面ディスプレイなど次世代電子デバイスへの展開が期待されます。

さらに本研究は、奈良女子大学の学部学生との緊密な共同作業によって進められたものであり、教育と研究が直結した取り組みの中から、実用的な機能材

PRESS RELEASE

料の提案という明確な成果が導かれた点でも大きな意義を持ちます。大学内での基礎的かつ独自性の高い研究活動が、次世代のエレクトロニクス技術への橋渡しとなり得る可能性を示しました。

【まとめと展望】

得られたレドックスヒドロゲルは、柔軟で成形性に優れながらも、電気化学的には安定かつ可逆な酸化還元応答を示し、材料としての高い機能性を備えていました。従来の液体電解質と異なり、ゲル状でありながら電子移動とイオン拡散が両立するこの構造は、柔らかく自由に加工できる電子デバイスへの応用に大きな可能性を拓くものと期待されます。とくにメチルビオロゲンを電気クロミック分子として組み込んだ単層構造の試作デバイスでは、電圧の印加により視覚的に明瞭な色彩変化が得られ、実用性に繋がる成果が得られました。

また本研究は、奈良女子大学における研究の中から生まれたものであり、学部在学中に研究に携わった学生とともに、時間をかけて丁寧に積み上げてきた成果です。その過程には、試料調製から測定・解析に至るまで、大学内で一貫して取り組んできた知的試行錯誤が含まれており、研究教育の現場から実際に機能する材料が生み出されたという点でも、学術的にも教育的にも意味のある成果です。今後、このような大学での教員と学生を主体とした取り組みからさらに多機能・高性能なゲル材料が開発されることが期待されます。

【用語解説】

1. ヒドロゲル (ハイドロゲル)

高分子が網目状に結びつき、その内部に水を含むことで得られる柔らかい材料。ゼリーのような外観を持ち、生体適合性が期待できるため、医療、化粧品、環境工学など幅広い分野で注目されている機能性材料の一種です。

2. レドックス

酸化（物質が電子を失う）と還元（物質が電子を受け取る）を併せた化学反応の総称で、電池の発電原理や生体内の代謝、光合成や太陽電池の挙動など、多くの自然現象や先端技術において基本的かつ重要な役割を果たしている概念です。

3. フェロセン

鉄原子を有機分子が上下から挟んだ「サンドイッチ構造」を持つ安定な有機金属化合物。酸化還元反応が繰り返し可能で、電子材料、電気化学センサー、触媒などの分野で応用されています。水には溶けにくいという性質があります。

PRESS RELEASE

4. 包接化合物

シクロデキストリンなどの分子の空洞部分に、他の分子がすっぽりと入り込んだ構造をもつような化合物で、溶けにくい物質の水溶化、におい成分の安定化、薬剤の徐放制御などに使われ、食品・医薬・材料分野で広く応用されています。

5. エレクトロクロミックデバイス

電圧を加えることで材料の色が可逆的に変化する現象「エレクトロクロミズム」を利用した表示装置で、スマートウィンドウや自動車ミラー、低消費電力型ディスプレイなどに応用され、省エネルギー技術としても注目されています。

【論文情報】

論文題目 : Electrochemical Properties of a Ferrocene-Containing Poly(vinyl alcohol)-Based Redox Hydrogel and Its Application as a Matrix for Electrochromic Devices

著者名 : Yutaka Ohsedo* and Riri Eguchi

* 責任著者

掲載誌 : Journal of Materials Chemistry C (Royal Society of Chemistry)

掲載日 : 2025 年 7 月 21 日

DOI : 10.1039/D5TC02004B

【本件に関する問い合わせ先】

奈良女子大学研究院工学系 准教授 大背戸 豊

TEL : 0742-20-3467

E-mail : ohsedo@cc.nara-wu.ac.jp

※お問い合わせは、なるべく E-mail にてお願いいたします。

(機関窓口)

奈良女子大学 総務課 広報・基金係

TEL : 0742-20-3220

E-mail : somu02@jimu.nara-wu.ac.jp