

色素液晶： 色を超えたエコマテリアルへの応用

東京理科大学 理学部第二部 化学科 准教授 | ^レ^バ^ン^コ^ア LE VAN KHOA

1. 身近な色素

「色素」という言葉を耳にしたとき、多くの人々は衣服を染める工業用染料や工場の排水を連想し、どこか「人工的」で「不安全」なものという印象を抱きがちである。しかし、私たちの生存戦略や文明において、色素は欠かすことのできない極めて重要な役割を果たしている。情報は色によって識別され、心理的な豊かさや製品の機能性を支える基盤となっているのである。色彩は単なる視覚情報にとどまらず、私たちの感情や行動にまで深い影響を及ぼす、生命にとって不可欠な要素と言える。

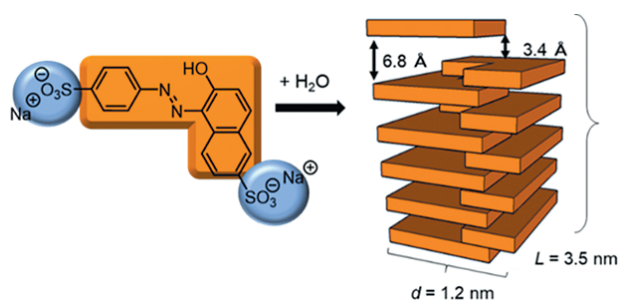
私たちの日常生活を見渡せば、色素は単なる装飾を超えた、驚くべき機能を持つ物質であることがわかる。例えば、栄養ドリンクに含まれるビタミン B2 (リボフラビン) は、暗所で紫外線を照射すると鮮やかな黄緑色の蛍光を発する。また、紫キャベツから抽出されるアントシアニンは、溶液の pH 変化に応じて赤から紫、緑、黄色へと劇的にその色を変える。これらの物質は、子供向けの科学図鑑や自由研究の参考書で、家庭でできる簡単な実験として頻繁に取り上げられている。身近な食材や飲料が、光や酸・塩基といった外部刺激に反応して劇的に姿を変える様子は、多くの子供たちにとって科学の入り口となっている。これらは天然由来の成分として、古くからその安全性が広く認められているのである。これら天然色素に対し、現代の色彩豊かな社会を切り拓いたのが「合成色素」である。

世界初の合成染料が発見されたのは 1856 年のことである。イギリスの化学者ウィリアム・ヘンリー・パーキン (William Henry Perkin) は、わずか 18 歳という若さで、合成化学の歴史を塗り替える大発見をした。当時、紫色に染めることは極めて困難であり、紫は「貝紫 (チリアン・パープル)」と呼ばれ、地中海産の



【図 1】 英国ヴィクトリア女王に献上されたモーブイン染色絹織物。(出典：Science Museum Group, Object No. 1947-117)

アッキガイ科の貝類から抽出される、極めて希少で高価な色であった。わずか 1 g の染料を得るために 1 万個以上もの貝の分泌腺を必要とし、その価値は同重量の金にも匹敵した。このため、古代ローマや中世ヨーロッパにおいて、紫色の衣服の着用は「禁色」として厳格に制限され、皇帝や王族などの特権階級にのみ使用が許された「高貴な色」だったのである。紫は権力と富、そして神聖さを象徴する色として長く君臨してきた。このような状況下で、パーキンは当時猛威を振るっていたマラリアの特効薬、キニーネ (Quinine) を人工的に合成しようと研究に没頭していた。当時キニーネは天然のキナ樹皮 (Cinchona bark) からしか抽出できず、極めて高価であったため、安価な石炭由来のアニリン (Aniline) から合成する試みは、当時の医学界・化学界にとって最大の悲願であった。ある実験の最中、目的物の合成には失敗してしまったが、代わりに試験管の中には黒っぽい泥状の残渣が生成された。一見すると失敗に思われたが、彼がこの残渣をアルコールで抽出したところ、溶液は類を見ないほど美しい紫色へと劇的に変化した。これが世界初の合成染料であるモーブ (Mauve)、後のモーブイン (Mauveine) の誕生である【図 1】。パーキンはこの偶然の発見により、それまで特権階級のものであった



【図2】 Sunset Yellow FCF (SSY, 食用黄色5号)の分子(左)と集合体(右)。

「紫」を誰もが利用できるものへと変え、現代の合成化学の幕開けを告げたのである。この発見は、その後の医薬品や合成化学の発展を支える巨大な化学産業の礎となった。

本稿で扱う「法定色素」とは、食品、医薬品、医薬部外品、および化粧品への使用が法律で認められている特定の着色料（主に有機合成タール色素）である。これらは厚生労働省によって規格や使用基準が厳しく定められており、安全性に基づき以下の三つの区分に分類される。

「第一部」は最も使用範囲が広く、経口摂取される内服薬（赤色102号、黄色5号など）や、菓子・清涼飲料水などの食品（黄色4号、青色1号、赤色2号、黄色5号など）、マウスウォッシュなどの医薬部外品（黄色4号、青色1号など）への使用が認められている。

「第二部」は主に外用医薬品、および粘膜に使用されるものを含む外用剤や、口紅・アイシャドウなどの化粧品への使用が認められた色素群である。例えば、薬用入浴剤の鮮やかな黄緑色の蛍光を演出する色素（黄色202号の(1)など）も、この区分に該当する。

「第三部」は、粘膜に使用されるものを除く外用医薬品や、シャンプー・ヘアカラーといった化粧品などに限定された色素群である。本稿で用いる Sunset Yellow FCF (SSY) 【図2】は、一般に「黄色5号」として広く知られる「第一部」の法定色素である。これは食品分野でも長年重用されてきた、安全性に優れた色素分子である。

色素が持つこの高い安全性と生体適合性は、次世代の機能性材料を設計する上で極めて重要な基礎となる。安全な法定色素を、物理的な秩序を持つ「液晶」や、水を大量に保持する「ヒドロゲル」と組み合わせることで、単なる色付け以上の価値を持つ新たなソフトマ

テリアルへと進化させることが可能になるのである。

2. 色素液晶とは

全ての色素ではないものの、特定の色素分子は溶液中で自発的に配列し、秩序構造を形成する性質を持つ。これは一般に「色素液晶」あるいは「クロモニック液晶」と呼称される。ちなみに、学術名である「クロモニック液晶」の由来は色素ではなく、最初に見出された抗喘息薬の化学骨格「クロモン構造」にある。現在、この液晶相を示す物質の多くは色素であるが、そのルーツは医薬品にあるという歴史的経緯が、この名称のユニークな点である。

2.1 リオトロピック液晶

一般に物質は、温度変化に伴って固体、液体、気体という三つの状態（三態）の間を移り変わる。しかし、特定の物質においては、固体の持つ一定の方向に揃う規則性（配向秩序）と、液体の持つ自由に動き回れる流動性（位置秩序の欠如）を同時に併せ持つ中間的な状態が出現することがある。これが液晶である。液晶はその発現機構によって二つに大別される。一つは温度変化によって相転移する「サーモトロピック液晶」であり、液晶テレビなどのディスプレイ技術に不可欠な材料として広く知られている。一方、本稿で着目するのは「リオトロピック液晶（Lyotropic Liquid Crystals: LLCs）」と呼ばれる系である。これは、温度だけでなく、溶媒中における分子の濃度の変化によって液晶相が発現する物質群を指す。このリオトロピック液晶こそが、生命現象や私たちの身近な製品の機能性を支える重要な鍵を握っている。

2.2 界面活性剤との違い

水溶液中で形成されるリオトロピック液晶は、その形成原理から大きく二つのグループに分けられる。一つは、石鹸や洗剤などの界面活性剤に代表される「両親媒性分子」による系である。石鹸の分子は、水に馴染みやすい「親水基（頭部）」と、水を弾く「疎水基（尾部）」を持ち、水中で疎水部を内側にして集まることで球状のミセルや層状のラメラ相を形成する。そしてもう一方が、本稿で主題となる「色素液晶」である。

専門的には「クロモニック液晶 (Lyotropic Chromonic Liquid Crystals: LCLCs)」と呼ばれるこの系は、両親媒性分子とは異なる原理で秩序を形成する。色素液晶を構成する分子は、石鹸のような「頭と尾」という単純な構造ではない。分子の中央部に剛直で平坦な芳香環構造 (疎水性コア) を持ち、その両末端や外周にイオン性の親水基を備えているのが特徴である。つまり、疎水的な中心部を親水的な部位が挟み込むような対称性の高い構造をしている。この独特な形状ゆえに、水中で分子同士がトランプのカードや硬貨のように垂直に積み重なり、一方向に長く連なった「棒状の超分子集合体 (Chromonic aggregates)」を形成する。

ここで興味深い事実は、分子構造が酷似していても、必ずしも全ての分子が液晶性を示すわけではないという点である。例えば、SSY と非常によく似た化学構造を持つ「オレンジ G (Orange G)」という化合物がある。両者は共にアゾ基 ($-N=N-$) を中心とした芳香環構造を持つが、オレンジ G を水に溶解させても、いかなる濃度条件においても液晶相は出現せず、等方性液体のままである。SSY が液晶相を形成する一方で、オレンジ G ではそれが形成されない理由は、親水基であるスルホ基の置換位置の僅かな違いにある。この小さな差異が、分子同士の有効な積層 (スタッキング) を阻害してしまうのである。このことは、色素液晶の形成には分子全体の平面性と末端基の導入位置の絶妙なバランス、すなわち緻密な分子設計が不可欠であることを示唆している。

2.3 自己集合の駆動力

色素液晶の形成は、主に二つの物理的な駆動力によって制御されている。

(i) π - π 相互作用：平面状の電子雲を持つ芳香環同士が垂直方向に重なり合い、引力的相互作用によってエネルギー的に安定化する積層現象。

(ii) ナノ相分離：疎水的な中心コアと親水的なイオン性末端基が、水中でナノスケールの領域で分離する現象。

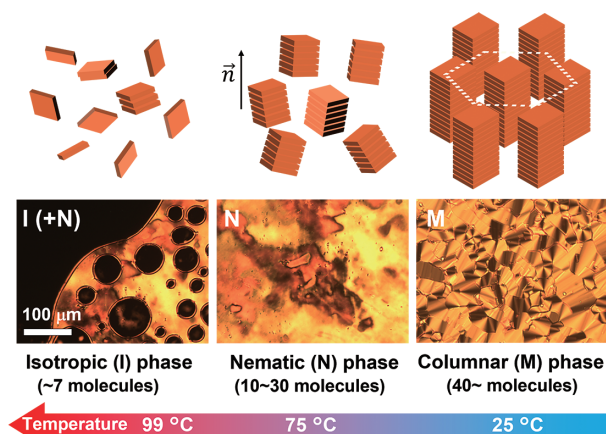
これらの駆動力により、分子は水中において垂直に配列し、一方向に連続した「棒状の超分子集合体」を形成する。色素液晶の特徴として、界面活性剤に見られるような明確な臨界ミセル濃度 (CMC) を必要とし

ないという点が挙げられる。極めて低濃度の段階から分子の積層 (スタッキング) は始まっており、濃度の増加に伴って、集合体から 1 分子を除去するのに必要な「スタッキングエネルギー (切断エネルギーともいう)」に基づき、集合体の長さ (相関長) が連続的に増大していく。広角 X 線回折 (WAXD) による測定では、積層された分子間の距離 (スタッキング距離) は、一般に約 3.3~3.4 Å という極めて一定に近い値を示す。ただし、この積層構造を構成する分子数は、色素の種類や溶液の温度、濃度条件に依存して変化する。

2.4 相転移挙動

色素液晶は、濃度および温度条件に応じて以下のような相転移を示す。SSY 水溶液の温度依存性を例に、その集合状態の変化を詳述する¹⁾ [【図 3】](#)。

- ・**等方相 (I 相)**：高温領域では、分子はランダムに分散しているか、あるいは数分子程度の短い集合体として存在する。この状態では光学的な異方性 (複屈折) を示さないため、偏光顕微鏡下 (クロスニコル) ではテクスチャー (光学組織) が観察されず、一様な暗視野となる。
- ・**ネマチック相 (N 相)**：温度の低下に伴い、発達した棒状集合体は互いの長軸方向を一定の向きに揃え始める。この相では、約 10~30 分子程度が積層した集合体となり、流動性を保持しつつ、マーブル・テクスチャー、もしくは縞・筋状の模様が特徴的なシュリーレン・テクスチャーが観察される。
- ・**カラムナー相 (M 相)**：さらに温度が下がると、集合体は二次元的な位置秩序 (ヘキサゴナル配列) を



【図 3】 SSY 水溶液 (質量モル濃度約 1.40 mol/kg) の温度による相転移。

持ってパッキングされる。この相では、40～70 分子程度の長大な棒状集合体へと成長し、流動性がほとんど見られない、鉛筆の削りカスのようなテクスチャーを呈する。

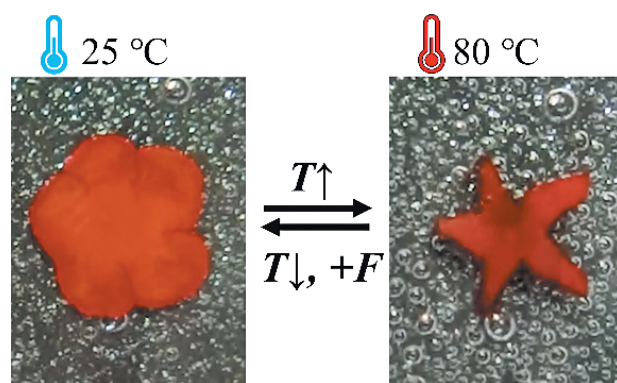
2.5 生体分子との構造的類似性²⁾

色素液晶に見られる分子の垂直積層プロセスは、生物学的な高次構造の形成原理と密接に関わっている。例えば、DNA の二重らせん構造において、塩基対が垂直に重なり合う「スタッキング」は、色素液晶の自己集合と共通の物理原理に基づいている。特に注目すべき知見として、わずか 6～20 塩基対程度の非常に短い二本鎖 B 型 DNA オリゴマーであっても、ネマチック相やカラムナー相といった液晶相を発現することが報告されている (中田ら, Science 318, 1276-1279, 2007)。この発見は、生命誕生前の原始地球における進化の謎を紐解く重要な手がかりになると考えられている。すなわち、まだ酵素などの複雑な仕組みが存在しない初期の地球において、短い遺伝物質が物理的な「自己組織化」によって長鎖へと成長し、情報の複製や重合を可能にしたという、生命の初期段階におけるミッシングリンクを物理学的に支持する知見である。つまり、私たちが研究している色素液晶は、単なる新しい材料開発ではない。それは、生命誕生のドラマを研究室で再現する壮大な挑戦であり、将来の医療を支える革新的な人工材料 (バイオマテリアル) を生み出す羅針盤となるのである。

3. 色素液晶導入ゲル

3.1 ゲルとは

高分子ゲルとは、長い鎖状の高分子が架橋 (橋渡し) によって三次元的な網目構造を形成し、その内部に多量の溶媒を保持して膨潤した状態の物質と定義される。この内部に含まれる溶媒が「水」であるものを、特に「ヒドロゲル」と呼ぶ。ここで興味深いのは、その呼称である。英語では「Gel」を「ジェル」と発音し、一般的にはヘアジェルや化粧品のジェルなど、日常生活に馴染みのある言葉として定着している。しかし、日本の科学技術分野、特に化学や高分子科学の領域では、伝統的にドイツ語の発音に基づいて「ゲル (Gel)」



【図 4】 変形した形状記憶ゲル (左) と、加熱により回復した後の形状 (右)。

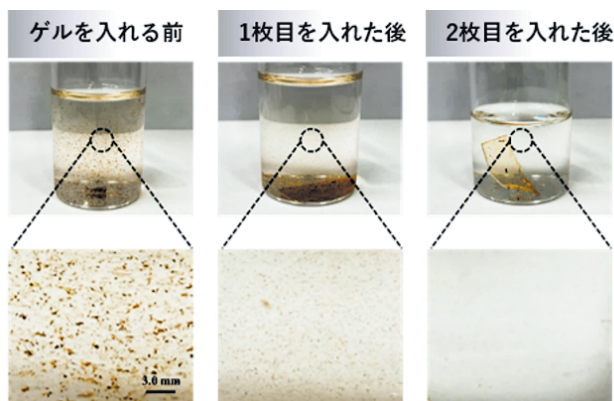
と呼ぶのが通例である。これは、日本の近代科学がドイツの学問体系から強い影響を受けてきた歴史的な経緯 (歴史的経緯) でもある。

ヒドロゲルは、私たちの生活において古くから非常に馴染みのある材料である。食品分野では、ところてん、こんにやく、ゼリー、豆腐などがその代表例である。また、工業・衛生分野では、おむつなどに使われる高吸水性高分子、芳香剤、保冷剤、さらにはソフトコンタクトレンズといった医療製品に至るまで、極めて幅広く利用されている。学術的には、ゲルはコロイドや液晶と並ぶ「ソフトマテリアル」の一種に分類される。

私たちはこれまで、異方性ゲル³⁾、高靱性ゲル⁴⁾、形状記憶ゲル【図 4】など、多様な機能性ゲルの開発に取り組んできた。本稿ではその過程で新たに見出した、「水中接着性ゲル」の特異な性質とその応用について紹介する。

3.2 水中接着性ゲル

私たちは、特定の色素液晶をヒドロゲルの中に組み込む研究の過程で、当初の目的であった形状記憶ゲル以外に、極めて特異な性質を見出した。それが「水中接着性」である。通常、市販されている接着剤の多くは水に濡れた表面では粘着力が著しく低下するが、色素液晶を導入したヒドロゲルは、驚くべきことに水中においてもガラスやプラスチックの基板に対して接着性を示したのである。その粘着力は約 0.02～0.03 N/mm² 程度であり、決して強力とは言えないものの、水中という環境下で確実な粘着力を発揮することが確認された。比較対象として、市販の 2 液混合型エポキ



【図 5】 水中接着性ゲルによる汚濁成分の回収。ゲルを 2 個投入するだけで、著しい水質の改善が確認された。

シ接着剤の接着力は一般的に $5 \sim 15 \text{ N/mm}^2$ に達するが、これらは水中では接着能を喪失する。

この水中接着機能の実用性を探るため、私たちはある検証実験を行った。それが水中の微小生物である「ボウフラ」(蚊の幼虫)の捕獲実験である。実験では、ビーカー内の水中に色素液晶導入ゲルを設置し、その表面でボウフラを捕獲できるかを観察した。しかし、結果としてボウフラを捕獲することは困難であった。ボウフラは体長が 5 mm 程度であり、非常に活発に泳ぎ回るため、ゲルの表面に接触しても、その強い逃避行動を抑え込むほどの拘束力は得られなかったのである。

だが、この「失敗」とも言える結果が、実は新たな研究の羅針盤となった。活発に動く生物を捕まえるのが難しいのであれば、水中に漂う「動きの遅い、もしくは静止した物質」であれば、効率的に捕捉できるのではないかと考えたのである。そこで着目したのが、現代の深刻な地球環境問題の一つである「マイクロプラスチック」の捕捉である【図 5】。

3.3 マイクロプラスチックの捕捉

マイクロプラスチックとは、サイズが 5 mm 以下の微細なプラスチック破片を指し、海洋生態系への悪影響が危惧されている。現在の採取技術では、目の細かい網を用いた曳網調査が主流だが、数百マイクロメートルを下回る微細な粒子の計量は困難を極めている。

私たちは、色素液晶導入ゲルを用いて、水中に浮遊する微細なプラスチック粒子の捕捉実験を行った。対象として、海洋ゴミとしての排出量が多いポリエチレン (PE)、ポリプロピレン (PP)、ポリスチレン (PS)、

ポリ塩化ビニル (PVC)、そしてペットボトルの主成分であるポリエチレンテレフタレート (PET) を用いた。特に PET 粒子の実験では、ゲルを投入してわずか 5 分かき混ぜるだけで、水中に分散していた PET 粒子の約 80% を捕捉することに成功した。電子顕微鏡による観察 (SEM) では、ゲルの表面にプラスチック粒子が隙間なく、密に付着している様子が確認された。この結果は、色素液晶導入ゲルが、水中のマイクロプラスチックを選択的に回収する高度な環境浄化材料として極めて有望であることを示している。

3.4 なぜ水中でくっつくのか

一般的に、接着のメカニズムは「機械的接合 (アンカー効果)」「化学結合」「物理的相互作用 (ファンデルワールス力など)」の主に 3 つに分類される。色素液晶導入ゲルが水中で機能する理由は、これまでの常識とは異なる、二つの独自の物理化学的要因によるものと考えられている。

① 集合体による「合唱 (コーラス)」効果

最も大きな特徴は、ゲル内部で色素液晶がバラバラの分子としてではなく、一方向に長く連なった集合体として存在している点である。通常の接着剤では、個々の分子が基板表面と結合を作ろうとする。しかし、本系では、何十個以上という色素分子が巨大な棒状の集合体を形成している。この一つの超分子ユニットが基板表面との間に水素結合やファンデルワールス力を働かせるため、個別分子が単独で結合するよりも遥かに強力で、安定した接着が実現されるのである。いわば、一人ひとりの歌声ではなく、全員が一斉に歌う合唱 (コーラス) のように、集団的な相互作用が接着を支えているのである。

② 疎水性による「水押し出し」効果

水中接着において最大の敵は、基板表面を覆っている「水の膜」である。接着剤が基板に触れる前に、この水膜が邪魔をしてしまう。しかし、色素液晶分子はその構造の中心部に「疎水性コア (水に馴染みにくい部分)」を有している。分子が垂直に積み重なった集合体は、その中心核から強力な疎水性を発現する。これが基板表面に接近すると、界面に存在していた水分子を自発的に押し出すガイド役となり、接着部位が直接基板に接触できる環境を作り出すのである。さらに、

一度接着が形成されると、この巨大な疎水性の集合体が「防水壁（シールド）」のような役割を果たし、周囲の流動的な水分子が再び接着界面へ侵入してくるのをブロックする。この「水の排除・ブロック」と「集団的結合」の組み合わせこそが、色素液晶導入ゲルが水中接着剤として機能する核心的メカニズムである。

4. おわりに

砂が半導体に、忌まわしき石油が文明の動力源に変わったように、「不要」と思われたものが「不可欠」へ昇華する転換の歴史を積み重ねてきた。かつて単なる色彩に過ぎなかった色素も、今や環境問題を解く鍵へと姿を変えようとしている。読者の皆さんが日常で色付きのゼリーを目にしたとき、それを単なるお菓子として見るのではなく、社会課題を解決し、地球の持続可能な未来を拓く革新的なエコマテリアルとして見ていただければ幸いである【図6】。

参考文献

- 1) H.-S. Park *et al.*, J. Phys. Chem. B 112, 16307 (2008).
- 2) M. Nakata *et al.*, Science 318, 1276 (2007).
- 3) K. Shiraishi *et al.*, Macromol. Rapid Commun. 41, 1900631 (2020).
- 4) K. V. Le *et al.*, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 762, 123 (2023).



【図6】 ヒドロゲルの例としてのゼリー