生物にみる構造的発色

光が織りなす夢の繊維

Structural Color of a Living Things —Dream Fiber Woven by Light—

田畑 洋 日産自動車(株) Hiroshi TABATA ● 浅野真理 帝人(株) Makoto ASANO ● 清水 進 田中貴金属工業(株) Susumu SHIMIZU

新しい質感素材および繊維業界においても待望視されている高澄性スーパーカラーの創出に際して生物に学ぶという観点から、生物の構造的発色を概観し、蝶の光学特性の事例とそれを種とした光干渉現象に基づく非染色の構造的発色繊維の現状に触れ、新技術の流れについて述べた。

①——はじめに

繊維に関する研究・開発について、極めて大胆に類別すれば、それは本論の主題でもある①心理・生理、さらに文化等にも関わる感性繊維分野のほかに②高強度等を追求する力学性繊維分野と③分離機能等を追求する機能性繊維分野に分類できる(図1)。この感性繊維分野における大きな命題としては、新しい材質感や図1に示したスーパーカラーともいうべき色味の創出にある、と考えられる。前者に対しては、近年、コンジュゲート繊維製造技術を主体にした多種多様な異形断面繊維の成形と後加工技術との組み合わせによる開発および商品化がなされてきたのは衆知の通りである¹⁾。後者の問題に対しては、天然染料から合成染料全盛の今日にあって、深み感

図1 社会的要請の高い繊維分類

図2 染料の歴史と技術の流れ概観

のある高澄色や艶やかな鮮明色などの追求は、繊維業界にとって永遠のテーマといわれている。こうした要請に対して、最近、いくつかの試みがなされてきている。例えば、透過光の多彩な色相変化の発現を目的に、分子配向異方性高分子フィルムを2枚の偏光フィルムで挟んだ積層フィルムを繊維状に切断して製織する方法やスパッタリング技術を利用して金属チタンと酸化チタンの交互積層による発色繊維あるいは織布等の創出である²⁾。

これらの試みは、染色という通常の物体色の光学系とは異なり、光学物理的現象を直接的に利用した発色方法である。これらの発色を総称して構造的発色といい、従来の技術の流れを変えるもの、ということができる(図2)。これらの構造的発色の追求は、基本的には染料や顔料では困難であった澄んだ発色と共に新しい材質感が期待されるものと考えられよう。

②——生物にみる構造的発色

2-1. 運動性と非運動性の構造的発色

自然界はまさに色に囲まれた世界である。その中で生物界に視点を当て、その発色要因をみてみると、その多くは各種の含有色素に起因した発色であるが、他方、体表面の微細かつ特殊な構造形態によって光を巧みに制御して種々の光学特性を発現している例も多くみられる。特に動物の場合、一般的には青色色素を体内で合成できないはずであるが、熱帯性魚類から昆虫類に至る幅広い種にみられる。近年、これらは新しく構造的発色 (structural

表1 構造的発色の基本的原理と動物界の事例

原理	事例
チンダル散乱現象	①軟体動物腹足類のアメフラシ・ウミウシ等の体表の青斑…虹色素胞 (iridophore) の細胞質内に $0.1\ \mu\text{m}$ 程度の微粒子が充満 ②昆虫類のトンボの仲間、例えばアオイトトンボの腹部の青緑色…表皮虹色素胞内に $80\ \text{nm}$ 程度の顆粒の存在に起因 ③七面鳥・マンドリルの顔面の青い紋様、シャムネコ・西洋人の碧眼…虹彩の黒色素胞中の小型メラニン顆粒の存在に起因
薄膜干渉現象	①ホタルイカ・イイダコ等の皮膚の紋様…虹色素胞内の反射小板の屈折率・枚数・間隔と小板間液の屈折率に依存 ②トカゲ・カメレオン等の爬虫類の虹色素胞 ③昆虫の翅の一部
回折現象	①孔雀の羽毛やエビの殻など、表皮細胞の生成物 (ケラチン・キチン等) の微細な線条や凹凸に起因

color) と呼ばれる発色現象でまとめることができる。表1に構造的発色への基本的な光学物理現象とおもにそれらを利用している代表的生物例を示した³⁾。ここで見られるように、発現方式には2種類ある。その一つは動物行動学等では警戒色や保護色などと呼ばれるような外界からの刺激入力によりダイナミックに体色を変化させる現象であり、体表面に存在する色素胞 (chromatophore) と呼ばれる細胞内の低屈折率特性をもつ細胞質と顆粒に起因するチンダル散乱現象による場合、あるいは細胞質と複数枚存在する高屈折率特性をもつ反射小板 (刺激入力により交換神経伝達物質であるノルエピネフリン等の物質の放出量によって瞬時に小板間距離の制御が起こる) との作用により、反射スペクトルピークを瞬時にシフトできる機構などによるもので「運動性の構造的発色」といわれている^{4), 5)}。他方は、体表皮細胞が生物の成長過程の役割に応じて形成される規則性の高い、微細な構造形態に基づき発色するものであり、前者に対して「非運動性の構造的発色」というべきものである。

基本的な発色原理は表1のように集約されるが、実際の生物にみられる美しい材質感、これらの現象の複数の重なり合いになっているため、実際の発色機構は極めて複雑であると考えられる。

2-2. 非運動性の構造的発色—蝶翅—

1980年代、従来の工学の枠を越えて、例えば前節で述べたような生物のもつ優れた機能に学ぶとするバイオミメティクス (生物機能模倣工学) と呼ばれる新しい工学領域が始まり、少なからぬ興味もたれつつある。本節では、そのような観点から一つの事例を紹介する。

蝶翅の発色は、一般的には含有色素による場合が多い

図3 スルコウスキーモルフォ蝶 (♂) とその鱗粉断面の電子顕微鏡観察

A: 翅背面全景 B: 光学顕微鏡による翅背面の鱗粉配列形態 C: 鱗粉断面形態の電子顕微鏡写真 D: 鱗粉断面の模式図

が、そのような蝶翅においても翅背面 (upper surface) の紋様部分が観る角度によって色相の変化を生じさせる、いわゆるアニソトロピック特性を呈する場合がみられる。このような部分は、色素による物体色とは異なり、何らかの微細構造形態が関与していることが少なくない。ここでは、その代表例として南米産のトロピカルブルーかつ金属的光沢感に輝くスルクウスキーモルフォ (σ^7 : タテハチョウ科, モルフォ亜属) を取り上げて、その光学特徴の一部について概観してみる⁶⁾。

まず、蝶翅中のブルーに発色する色素の存在については、過去数種類のプテリジン化合物 (近紫外線照射により青色系に発色) が発見されており、1996 年、蝶翅から初めてバイオプテリンの発見も報告されたが⁷⁾、それらの含有総量からみても可視光領域での色彩効果はないと考えられた。同時に翅膜上に整然と配列されている鱗粉の断面形態が目された (図 3)。この鱗粉構造において、リッジの繰り返し方向を x 軸方向、奥行き方向を y 軸方向、ラメラの積層方向を z 軸方向とすると、その構造の基本的特徴は① x 軸方向に周期的、② y 軸方向に一樣、③ z 軸方向に積層となり、極めて単純な光学モデルとしては図 4 のような積層構造と解析された。

この光学モデルに基づき、薄膜積層干渉現象に対して、0 度入射-0 度受光の条件下でのフレネル理論をベースとした分光反射スペクトルのシミュレーションとスルクウスキーモルフォ蝶翅の顕微分光スペクトルとの一致性から、この例における主たる発色機構の基本が干渉反射であることが証明されたことになる (図 4)⁶⁾。ちなみに本蝶翅の三次元変角分光反射スペクトルにみられるようにアニソトロピック特性を示すと共に通常の物体色と

図 4 鱗粉断面が有する単純光学機能モデル

図 5 スルクウスキーモルフォ蝶翅の三次元変角分光スペクトル

測光条件: 入射角 = -45° , 受光角 = 30° , あおり角 = $-90^\circ \sim 90^\circ$

は異なった状況がみられる (図 5)。さらに、本蝶翅試料がもつ紫外線から赤外線に至る光学機能や優れた鮮やかさや光輝感等の材質感発現に対しては、別の原理・機構が存在しており、前述したようにその機能は非常に複雑である。

③——バイオミメティクス—光が織りなす夢の繊維——

3-1. 構造発色繊維^{8), 9), 10)}

この具体化としていくつかの方法論が試行されていることは最初に紹介した。ここでは前節の結果をベースに 2 種類の屈折率の異なるポリマーを用いた溶融複合紡糸法によって創製された例を紹介する。高い干渉発色機能を実現するためには、使用するポリマーの屈折率比の大きい方が有利である。しかし、多層薄膜による機能発現設計や成形時における両者の層界面での親和性や積層部位の相互の平行形成性などに対する適正な動粘性等、さらに形成を可能とする口金設計など必要要件は多岐にわたる。

これらを考慮した一つの例として、改質ポリエステルとポリアミドを用い、干渉反射主波長を 470 nm に設定して実現可能な発色断面構造設計への分光反射スペクトルシミュレーションが繰り返し行われたうえで、その構造繊維成形用開発された特殊な口金を用いた 2 元コンジュゲート方式により製糸された。製糸単繊維の積層部断面 (図 6) は 2 種ポリマーによる干渉反射波長領域の薄膜積層構造がきれいに具現化されている。この単繊維の全景および光学特性をみると、青色発色がみられ、スルクウスキーモルフォ蝶翅の鱗粉の光学特性との類似性がみられ (図 7)、光学機能の一つはほぼミメティクスされていると思われる。ちなみに図 7 中の通常糸 (比較的高い鮮やかな青色染色ポリエステル糸) は物体色であり、その光学特性との違い、例えば高光沢感を支える高い反

図6 構造発色繊維の積層断面中央部の電子顕微鏡写真

A

B

図7 光学顕微鏡による構造発色繊維全景(A)と顕微分光スペクトル(B)

測光条件: 入射角=0°, 受光角=0°

射率や光干渉色に基づく透明感ある高澄性などもうかがえるようである。

④—おわりに

これまで述べてきたように構造発色繊維の特徴は下記のようにまとめることができる。

- 1) 光干渉のため、澄んだ色彩と透明感、加工法によっては深み感等の複合的材質感も表現可能である。
- 2) 観る方向で色相が変化するアニソトロピック特性をもたせることができる。

- 3) 非染色繊維のため、環境保全や資源の面でも染色廃液の低減および染色工程に要するエネルギーの低減等にも貢献可能である。

繊維編物化においては、天然繊維系を含めて、これまで使用あるいは開発されてきた合成繊維系との複合化などにより、多種多様な見映えや材質感創製への大きな可能性をもっていると考えられる。さらに、構造の制御が基本技術であることから、多様な光学機能付加も可能である。

これまでの長い繊維開発の流れを省みれば、本論の構造性光学機能感性繊維ともいべき技術は、ある意味では新しい技術の流れといえ、そして始まったばかりともいえる。自然界で育まれた生物の機能は、まだまだ底が知れないものであり、本論および本技術もその一部であることを再記し、詳細は専門論文等を参照していただきたい。

文 献

- 1) 河田照芳: 高分子, 44(10), 662 (1995)
- 2) 平成6年度次世代繊維産業技術課題調査研究報告書, (財)機械振興協会・経済研究所, 平成7年3月, pp. 94
- 3) 田畑 洋, 熊沢金也: 光学, 27(1), 24 (1998)
- 4) 上島孝久: 細胞, 23(13), 501 (1991)
- 5) 藤井良三: 細胞, 23(13), 19 (1991)
- 6) H. Tabata, K. Kumazawa, M. Funakawa, J. Takimoto, M. Akimoto: *Optical Review*, 3(2), 139 (1996)
- 7) H. Tabata, T. Hasegawa, M. Nakagoshi, S. Takikawa, M. Tsusue: *EXPERIENTIA*, 52, 85 (1996)
- 8) 日刊工業新聞, 1997年10月4日
- 9) 繊維新聞, 1997年10月6日
- 10) 東京新聞, 1997年11月11日

田畑 洋 日産自動車(株)総合研究所材料研究所(237-0061 横須賀市夏島町1) シニアリサーチャー, 工博1968年茨城大学文理学部理科学卒, 1971年東京理科大学大学院理学研究科修士課程修了, 1971年日産自動車(株)入社, 1985年より現職。専門は無機化学, 材質感工学。〈趣味〉テニス, スキー, 絵画

浅野真理 帝人(株)繊維研究所繊維形成研究室(567-0006 茨木市耳原3-4-1) 研究員
1993年東京大学工学部反応工学科卒, 1995年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了, 1995年帝人(株)入社。専門は化学生命工学。〈趣味〉映画鑑賞

清水 進 田中貴金属工業(株)技術開発センター(254-0076 平塚市新町2-73) 主席技術員
1956年田中貴金属工業(株)入社, 1996年より現職。専門は精密加工技術。〈趣味〉カメラ