

モルフォ蝶の構造色

大阪大学大学院生命機能研究科 木下修一

モルフォ蝶は中南米に棲む大型のチョウで、雄の翅表の強烈なコバルトブルーは古くから研究者の関心の的であった。この色をつくる原因は翅にあるわずか0.1mmほどの鱗粉の上にある、1 μ m 間隔の筋一本一本にある、200nm 間隔の規則正しい柵構造(図1)が関与していて、構造色と呼ばれている。

自然界の構造色は多層膜干渉が主な原因であることは、100年ほど前から言われてきたが、モルフォ蝶にそのモデルを当てはめると不都合な点がいくつも出てくる。多層膜干渉では干渉条件を満足する波長は入射角度が決まっており、また、正反射方向に反射されるだけである。そのため、平行光線を入射した場合には特定の波長の光が正反射方向にだけに反射され、拡散光を入射した場合には見る方向により反射光の波長が連続的に変化しなければならない。実験してみると、平行光線が翅に垂直に入射した場合でも、かなり広い角度範囲で青色が見られ、約50度くらい斜めから見て初めて赤紫色に見えることが確かめられる。このように高い反射率を持つと同時に、広い角度範囲で青色が見えるためには、誘電体多層膜だけでは考えることができない。

そこで、本来の柵構造にできるだけ忠実に、しかし一方ではできる限り単純化したモデルとして、誘電体多層膜が切れ切れになり柵構造をつくりだし、なおかつ、隣り合う柵構造の高さがランダムに変化しているというモデルを考えてみる。このモデルで光の散乱問題を考えてみると、隣り合う柵構造からの光同士はその高さの不規則性から非干渉となり、ひとつの柵構造内の干渉だけが効いてくることわかる。光は多層膜が切れ切れにすることによる回折効果のために広がり、ひとつの波長の光でも広い角度範囲で見られるようになり、角度変化をうまく説明できる。すなわち、モルフォ蝶の構造色は「干渉」と「非干渉」、あるいは、「規則性」と「不規則性」という相反する概念を一枚の鱗粉の上に共存させることにより、高い反射率と拡散光発生という二つの現象を同時に実現させているわけである。

モルフォ蝶にもいろいろな種類があり、青色が大変濃い種や透明感の強い種が知られている。こ

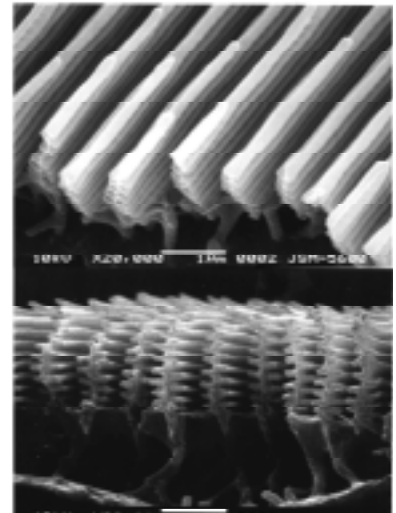


図1 モルフォチョウの鱗粉の電子顕微鏡写真。上は斜めから、下は断面。

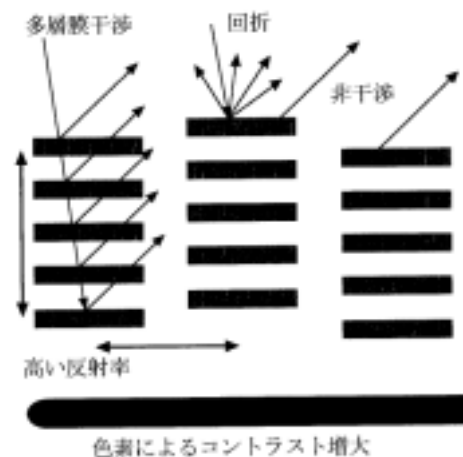


図2 モルフォチョウの構造色に寄与する因子

の違いは構造色そのものの違いではなく、青色のコントラストを増強する色素を持っているかどうかによっている。図2にモルフォ蝶の構造色に寄与する因子をまとめてみた。色素と構造色との協調による発色現象は自然界で進化の過程に獲得した構造色の一般的形態である。

生物のもつ構造色の仕組みを、規則性・不規則性という2つのパラメータを用いて概観してみよう(図3)。規則性という観点から見ると、生物界に存在する構造色は干渉を用いたものと、散乱によるものとの大別することができる。このうち、干渉を用いたものには、光の波長程度の規則性をもった回折格子、薄膜干渉、多層膜干渉などがある。自然界には回折格子は意外に少なく、多層膜や薄膜干渉のものが圧倒的に多い。

薄膜や多層膜などの規則的構造が平面あるいは大きく湾曲して広がっている場合はどうなるだろうか。このときは平面鏡や曲面鏡のように、構造色の面を介して景色が映ってしまう。このような構造色はオオゴマダラの蛹などに見られ隠蔽効果があるとされている。大抵の場合は、平面や曲面は何らかの形で分断され、ランダムな向きを持ち鏡面反射を防ぐ手段を講じている。この種の構造色は熱帯魚や甲虫の鱗片に見られ、むしろ自らの存在を示すために用いられていると思われる。タマムシの翅鞘には六角形の凹みが一面に見られ、多層膜が小さく湾曲して多く並び、薄膜や多層膜による干渉を残しつつ、鏡面反射を防ぎ、拡散光を発生する仕組みとなっている。

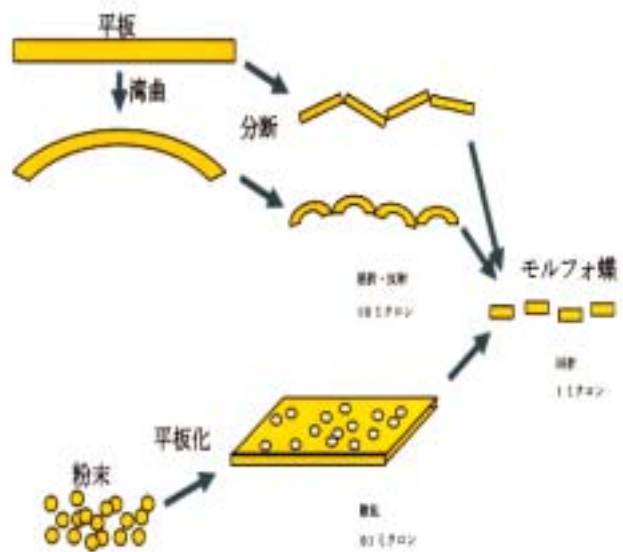


図3 さまざまな構造色の仕組み

分断された構造がさらに小さくなり光の波長と同程度となると光の回折の効果が効くようになってくる。こうなると分断された構造の向きの分布がなくとも光は拡散的に広がっていくので、干渉の効果とあわせると、強い反射と拡散光発生という2つの条件を満足することができるようになる。この場合の拡散光発生の空間的な単位は、蝶の場合は鱗粉上の筋によって決まるため、きめの細かく、かつ、方向性を持った拡散光をつくることことができる。

一方、膜に多くの穴がランダムに空いた構造はシジミチョウなどの鱗粉で報告されている。光の波長より十分小さい穴の場合は、チンダル現象のように振動数の4乗に比例した散乱過程が主要な効果として現れる。さらに、不規則性の度合いがすすみ、膜構造も崩れてしまうと、これはもう粉末と同じになり多重散乱がおき、散乱の波長依存性を失い、白色になってしまう。モンシロチョウの白は色素胞が多く並び、散乱の色であるといわれている。構造色は規則性を表す干渉効果とさまざまなサイズの不規則性を組み合わせた新しい型のナノ構造である。このようなさまざまなレベルの構造が生物界に分布しているのは進化の過程とはいえ大変興味深い。