

「モルフォチョウの構造色の仕組みを 徹底的に解明する」

木下 修一、吉岡 伸也

(大阪大学大学院理学研究科)

モルフォチョウは中南米に棲む大型のチョウで、雄の翅表の強烈なメタリックブルーは古くから研究者の関心の的であった。Mason は反射率が高く、光の入射角度により色が変わるなど光学的には多層膜構造ときわめて類似していることから、鱗粉の上にある多数の筋が多層膜構造によってできていることを考えた。その構造は Anderson らの電子顕微鏡写真により確かめられ、その後、Ghiradella の精力的な研究により、筋にある規則正しい柵構造が構造色に関与していることが分かった。モルフォチョウの一種 *Morpho didius* の翅表の下層鱗には 0.7 ミクロン間隔の多くの筋があり、その筋には 6-8 段の約 0.2 ミクロン間隔の柵構造がある。柵構造内の空気層とクチクラ層(屈折率 1.6)の繰り返しを誘電体多層膜とみなして垂直入射の時に最大反射率を与える波長を求めてみると 480nm となり、実感とも良くあっている。この構造が構造色に直接関係していることは、翅をメタノールなど液につけて空気の層を液体で置き換えると、計算どおりの波長シフトと反射率低下が見られることなどから確かめることができる。

構造色の仕組みに関して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、モルフォチョウ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。このことはすでに 1927 年に Mason も述べているが、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正反射方向だけに反射され、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、かなり広い角度範囲で青色が見られ、約 50 度くらい傾いてやっとな赤紫色に見えることを確かめることができる。また、鏡のような平坦性はなく、ピロードのような微細な輝きが見られるのも特徴である。このように高い反射率と同時に不規則な輝きを持たせるには、単純な誘電体多層膜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多層膜モデルをきれぎれにしたモデルを考えてみよう。このモデルでは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考え。このような高さのばらつきは電子顕微鏡写真をじっくり眺めてみると分かるが、柵構造が鱗粉の基部から斜上していて、隣り合う筋の間に顕著な連携がないことから、筋に垂直な面で切った断面で柵構造の高さが分布することを確かめることができる。

このモデルでの光の散乱問題を 1 次近似の範囲で取り扱ってみよう。すなわち、平行光が柵構造に影響されず入射し柵構造上に分極を作り出し、ホイヘンスの原理により光が放射されると考えるのである。放射される光も構造に影響されず放射されるとして、ブラウンホーフ領域で考えてみると、隣り合う柵構造からの光はその高さの不規則性から非干渉となり、ひとつひとつの柵構造内の干渉だけが角度変化に効いてくることがわかる。光

は多層膜が切れ切れになることによる回折効果のため広がり、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る。1つの棚構造内部では干渉が起きるため計算してみると角度変化をよく表すことができる。このことから紫色の光が垂直方向に反射されにくいのは、棚構造内部での干渉が打ち消す方向に働いているからである。また、実験結果で入射角度方向に山が見られるのは、多重散乱の効果である干渉性後方散乱が現れているからである。実験とモデル計算との差は棚の高さにわずかな空間相関の効果を加え、干渉する棚の実効的な数を減少させることで一致は更に良くなる。一方、非干渉な効果はブラウンホーファ領域では空間的にランダムな干渉パターンをつくるため、モルフォチョウ独特の輝きを作ると考えられる。反射率は棚構造の棚の数、棚構造の横幅と隣り合う棚構造との間隔との比で決められるので、棚の数が多く、隣同士が接近した構造ほど高い反射率を与える。

このように多層膜を切れ切れにして、さらに隣り合う多層膜からの反射光の位相に乱雑性をいれることによりモルフォチョウの特徴がよく現れることがわかった。そこで、モルフォチョウの構造色を特徴づけるキーワードは「多層膜干渉」、「回折」、「非干渉」ということになる。すなわち、モルフォチョウの構造色は「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生成という二つの現象を同時に実現させているわけである。

モルフォチョウにもいろいろな種類があり、コバルトブルーが大変濃い種(M. didius, M. adonis, M. rhetenor など)、透明感の強い種(M. sulkowskyi など)が知られている。こ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。つまり、M. didius の場合は構造色をあらゆる鱗粉そのものに、M. adonis の場合は別の鱗粉が色素を持っており、赤色側の波長領域を吸収することによって、青を際立たせているのである。色素と構造色の協調による発色は自然界で進化の過程で獲得した構造色の一般的性質ではないかと思う。

自然界の構造色は光の波長より小さい構造、規則性と不規則性の共存、構造色と色素の協調などのいろいろな組み合わせで、独特の色合いを出している。構造色はいろいろな側面からその研究の意義と今後の発展を占うことができよう。生物学的にはモルフォチョウのような強い色合いは警戒色や配偶活動、カムフラージュなどに使われていると考えられる。いずれにしても不規則性があるため、羽ばたきで大きな色の変化が出ないため、種独自の色合いが出せることになり、お互いの認識には大いに役立つだろう。一方、波長より小さい規則構造ということで、現在盛んに研究されているフォトニクス技術とも対比することができる。構造色もフォトニクスもともに光の波長より小さい規則構造という点においてはルーツを同じくしている。構造色の色はフォトニック結晶でいうフォトンギャップに相当する光が結晶中に入れず反射していることになるが、フォトニック結晶でいうような厳密な意味でのギャップではなしに、特定の方向からの光に対してその反射も不完全である。フォトニクス技術が完全なギャップをつくるため純粋な結晶を造るという過程から進んでいるとすれば、構造色の方は始めから視覚を意識して不規則性を積極的に取り入れている点で大いに異なっている。つまり、ルーツは同じでも進む方向が異なっているのである。このように構造色の問題は生物学的にも物理学的にも興味深い問題を含んでいる。