

SE-01

生物のナノ構造による発色と視覚の利用 Colorations due to biological nanostructures and utilization of vision

木下 修一
Shuichi Kinoshita

1. はじめに

光の波長程度の微細な構造による発色を構造色または構造発色と呼んでいる。構造による発色は、モルフォ蝶、クジャク、タマムシなどよく知られた生物だけではなく、自然界には広く一般的に分布している。生物の発色には大きく分けて、色素による発色と構造による発色がある。色素はさまざまな色を出すことができるが、構造色によるものはなぜかほとんど青か緑に限られている。これは、青色を色素で出そうとすると分子のサイズが大きくなり壊れやすくなるからという理由と、構造色のもつ高い反射率は紫外線が見える昆虫や鳥にとっては、もっとも見えやすい色に当たるといふ理由からだろう。

本稿では、生物の作り出す微細な構造による発色の仕組みを概説し、その中でも特に視覚を用いて特異な発色効果や質感を表現している例について述べる。

2. さまざまな微細構造による発色

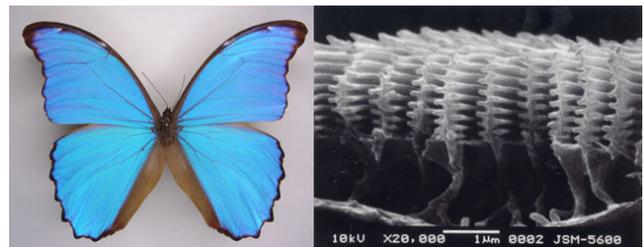
2.1 薄膜干渉と多層膜干渉

特定の色の光を選択的に反射させるためには、光の波長程度の微細な構造と光との相互作用が不可欠である。その中でもっとも簡単な相互作用はいわゆる薄膜干渉である。薄い膜の裏と表で反射した光が互いに干渉し合っており、特定の波長領域でのみ反射し発色することができるからである。これを更に強力にしたものは膜を積み重ねた多層膜である。屈折率差の大きい物質で多層膜を作ると、特定の波長領域での反射率を限りなく1に近づけることができるため、反射率の高いバンドを作ることができレーザー鏡などに使われている。自然界では単に反射率を高くするだけでは鏡のようになってしまうため、なんらかの方法で拡散光を出すような仕組みを取り入れなければならない。

タマムシではメラニンの微細な顆粒が集まった部分と欠いた部分が交互に20層ほど積み重なった多層膜を形成している。タマムシの場合の拡散の仕組みは、翅の表面にいろいろなスケールでの湾曲を入れることによって実現されている。さらに、メラニン顆粒が反射に寄与しない波長の光を積極的に吸収するため、コントラストの高い発色になっている。

モルフォ蝶は多層膜を切れ切れにして、リッジと呼ばれる筋状にしているところに特徴がある。この構造により、光の回折が起き、拡散光を作り出している。ただ、多層膜を分断しただけだと、隣にある構造で反射した光と干渉し合い回折格子になってしまう。そこで、切れ切れの多層膜の高さをわずかずつ変えて干渉効果を打ち消

すようにしている。こうすると、筋状の多層膜によって青色の選択反射が起き、さらにその青が回折効果により広がるのでどこからでも見えることになるのである。モルフォ蝶はそれに加え、構造が筋状であるので筋に沿った方向では光は広がらず、筋に垂直な方向にだけに広がるという、異方的な反射をつくることができる。この仕組みは、モルフォ蝶が羽ばたく時にその効果を発揮し、異方的な反射が青い光の帯をつくり、その帯が目に入ったときだけに強力な青色を感じさせ、それ以外の角度の時には光が来ないため、羽ばたくたびに青い光が点滅することになる。この点滅の仕組みとチョウ独特の不規則な飛び方を考えると、鳥にとって極めて捕獲しにくい対象となるだろう。これは、モルフォ蝶独特の防衛戦略かもしれない。



2.2 フォトニック結晶

クジャクの羽根の色は、小羽枝と呼ばれる毛のような微細な構造の中に、円柱状のメラニン顆粒が正方格子に整列することによって作られている。このような結晶状の構造は、光の波長程度の大きさなのでフォトニック結晶と呼ばれている。クジャクの羽根ではメラニン顆粒が2次元的に並んでいるので、2次元フォトニック結晶と呼ばれている。フォトニック結晶は、オパールやコロイド結晶でお馴染みであるが、メラニン顆粒が羽根の内部で自発的に整列するのは大変興味深い。クジャクの羽根の色が場所によって違うのは正方格子の格子間隔が表面から垂直方向にだけ変化することによってしている。タマムシの翅と同様に、小羽枝が三日月状に湾曲することにより拡散光を作り出し、また、メラニン顆粒がコントラストをあげるのに役立っている。

このような生物界でのフォトニック結晶は鳥以外にも、チョウ、甲虫、海洋生物など多くの生物で見つかっている。チョウの翅では鱗粉の下部にクチクラによる面心立方格子のネットワークが作られ、格子点には空洞の球があるなど構造的にも面白い。さらに、鱗粉全体が単結晶であるのではなく、方向の異なる結晶をいくつも寄せ集めて作られており、やはり拡散光をつくる仕組みでないかと思われる。

2.3 光散乱

光の散乱過程も発色に役立っている。レイリー卿は、空が青いことは光の波長の4乗に逆比例して散乱が起きるからであることを見つけた。このことから微粒子による光散乱をレイリー散乱と呼ぶようになった。同様の原理で青色を呈する現象にチンダル現象がある。液体に微粒子が分散しているとレイリー散乱により青色の波長の光の方が、散乱されやすいため青く見えるのである。この発色の特徴は、光の干渉を使っているわけでないの、見る方向により色が変化しないことである。

このような方向によらない発色も生物界ではかなり普通に見られ、トンボの胴体の水色やカワセミの羽根などもその例に挙げられる。電子顕微鏡でそれらの構造をみると、微小な球がランダムに分散していたり、複雑なネットワーク構造が見られたりと規則性が見られないので、レイリー散乱ないしはチンダルブルーであると思われる。しかし最近、この構造を空間フーリエ変換すると、リング状の構造の見られることが報告された。これは、一見不規則な構造であっても球のサイズやパッキングの仕方、あるいは、ネットワークの構造などに特徴的なサイズがあることを意味している。したがって、単なる散乱ではなく何らかの干渉が効いているのである。実際、これらの反射スペクトルを測定すると、レイリー散乱で予想される波長の4乗に逆比例するようなスペクトルではなしに、ピークを持つようなスペクトルであることが報告されている。しかし、この発色の原因については十分には解明されておらず、今後の問題として残されている。

3. 視覚が関連した構造色

3.1 光混合

マダガスカルに生息する蛾の中に世界一美しいといわれる蛾がいる。ニシキオオツバメガである。この蛾の翅は鮮やかな色で彩られている。翅一面にある鱗粉は長軸方向に強く湾曲していて、その湾曲に沿って多層膜が形成されている。光が湾曲した鱗粉に当たると、湾曲の頂上部分に当たった光は正反射をし、湾曲の側面部分は横に反射される。横に反射された光は隣の鱗粉の湾曲の側面部に当たって元に戻るのである。このとき、光は多層膜に斜めに入射するので、反射ピークは短波長側にずれる。眼には正反射した光と2回反射した光の両方が同時に入るため、色が重なり合い色混合を起こすのである。この蛾は多層膜の間隔をいろいろに変化させて反射される色を変え、さらに色混合によりさまざまな色を作り出している。同様の仕組みで、鱗粉内に半球状の窪みをいくつも作り、窪みの底と側面での反射を利用した蝶も報告されている。このような仕組みを使うと、側面で反射した光は多層膜に対して斜めに入射するので、偏光の影響を受けやすくなり、従って、偏光による色変化を作り出すことができる。

3.2 二色性

身近にいるハトの首にも視覚を利用した仕組みが見られる。ハトの首の羽根の小羽枝にも球形のメラニン顆粒が多数存在しているが、大きさが不ぞろいで、また、整

列していないので、発色には直接寄与していないと思われる。この部分で発色に関係しそうなのは、均一な厚さの外皮だけで、従って、その機構は薄膜干渉になる。しかし、ハトの首の羽根を良く見ると、緑色と紫色が見えるだけで、そのほかの色が見えないのである。そこで、羽根の反射スペクトルを測定すると、薄膜干渉で期待されるsin関数型の反射スペクトルが測定されるだけである。

ハトの薄膜干渉の特徴は、外皮の厚さが500-650 nmほどもありかなり厚い所にある。このような厚い膜での薄膜干渉では、可視域に2つの反射ピークを持つことができる。ハトはこの2つのピーク間隔をちょうど、目の視感度の青と赤のピーク間隔に合わせているのである。このときは、従って、我々は紫色に見え、見る角度を変化させて見ると、スペクトルはシフトし、今度は緑と紫外になるので、人間の目には緑に見えるのである。その中間では3原色すべてが見えることになり、灰色に見える。従って、見る角度を変えると色は紫と緑の間を変化するだけで、二色性が実現される。ハトの首では外皮の厚さが少しずつ変化した羽根が配置されているので、そのままだでも二色に見える。一方、鳥の視覚は4原色で、二色性は青と赤による紫と、緑と紫外による色で実現されていると思われる。

3.3 光沢感

私が最近興味を持っていることに、モルフォ蝶の翅に見られる、濡れたような光沢感がある。もちろん、標本を見ているので、濡れているわけではないのだが、実際に見てみると濡れたような金属光沢を示すのである。光沢感がどのような時に感じられるかについては古くからの研究があるが、一つの理由に、モルフォ蝶独特の異方性の強い反射があると考えられる。このように方向性のある反射の場合、右目と左目に入る光量が大きく異なり、立体視をしようとする脳に大きなフラストレーションを与えると考えられる。このときに、光沢感を感じるのである。実際、光沢感を感じる金属でも、正反射を避けて、ちょうど正反射がぎりぎり見えるような境界に目を持っていくと金属光沢を感じられることから裏付けられる。このような光沢感を蝶が意図して作っているのかどうかは分からないが、モルフォ蝶の種類には光る鱗粉の上にあえて、すりガラスのような光拡散板の役目をもつ透明鱗粉を置いて、光沢感を打ち消しているモルフォ蝶も数多く存在することから、捕食者である鳥、もしくは、雌か雄への何らかのシグナルと考えられなくもない。

4. まとめ

構造色を作り出す代表的な仕組みである薄膜・多層膜干渉、フォトニック結晶、および、光散乱について述べた。これまでの研究はともすれば、微細な構造ばかりに注意を向けがちであったが、構造色を見せたい相手の視覚や認知機能を利用した構造色も数多くあるのではないかと考えられる。光とマイクロな構造との相互作用だけではなく、マクロな構造の役割、さらには視覚や認知機能まで含めた問題など今後の発展が期待される。