

ハトの首はなぜ緑と紫だけなのか

大阪大学大学院生命機能研究科教授 木下修一

1. はじめに

最近、私たちの身の回りが急にカラフルになったような気がする。車や電気製品の塗装も色鮮やかであるし、携帯電話をはじめ、種々のディスプレイもカラーになり、包装紙やカレンダーなども以前とは比較にならないほどきれいな色で彩られている。この中でも、特に目をひくのは、見る方向で色が変わる、あの奇妙な塗装である。このような塗装は以前には見られなかったと思っている方も多いだろう。しかし、実際には、人々は昔からこのような装飾を使っていたのである。タマムシの翅(昆虫の「はね」はこの字を使う)で彩られた玉虫^{たまむしのすし}厨子、ヤコウガイの光沢部分を薄く貼った螺鈿^{らでん}という手法、クジャクの羽根飾りなどを考えてみると、その数は意外に多い。以前は自然の材料をそのまま使って装飾していたものが、現代のナノ技術で工業的に大量生産できるようになっただけなのであろう。

2. 構造色とは

それでは、方向により変わるあの奇妙な色の正体は何なのであろう。その前に、そもそも「色」とは何かを考えてみよう。「色」の概念を初めて科学的に解き明かした学者はニュートンである。ニュートンという重力の存在を示した学者として有名だが、光の世界でも多くの発見をし、その成果を「オプティクス」という本にまとめている。今でも、ニュートン式望遠鏡、ニュートンリングなどにその名前を残していることからわかる。ニュートンは太陽の光をプリズムに導き、それが虹色に分かれることを見いだした。また、一度虹色に分かれた色をプリズムに入れると再び白色にもどることも記している。この実験から、色は「屈折」という光の物理的な性質によるものだということがわかったのである。

これに対して、詩人であり科学者でもあったゲーテはその著書「色彩論」の中で、鮮やかな色彩の紙をじっと眺めて、その紙を取り除くと別の色が見える

ことを記している。彼は、色が目に属している像から生ずると説明し、これを生理的色彩とよんだ。ゲーテは、色が生理的な作用の結果生じるものだと考えたのである。ニュートンとゲーテのこの2つの考えは、現代ではどちらも正しく、色を理解する上で重要な要素であると考えられている。目では同じ赤色と感じられても、プリズムに入れて個々の色に分けてみるとまったく異なっていることもあるのである。実はこの原理を使って、テレビなどのディスプレイの色はつくられている。しかし、ここではとりあえず、色は光の物理的性質によるものとして話を進めていこう。

もし、白色の光が物体に当たって、赤色の光しか反射されず、残りの色の光は物体に吸収されたとするとどうなるのだろうか。もちろん、物体は赤い色に見えるだろうし、吸収された光は物体の温度を上げることに使われる。つまり、色が見えるためには光のエネルギーの一部をほかのエネルギーに変えることが必要なのである。これが普通の色の原因になっている。

一方、もし膜などの構造があって、赤色は反射するが、その他の光は透過して目に入らなかったらどうなるだろう。やはり、目には赤色が見えるが、この場合はほかの色の光エネルギーは別のものに変えることなくそのままである。このような色を構造による色、すなわち「構造色」とよんでいる。先ほどの、見る方向で色が変わる奇妙な性質は実は構造色と関係している。構造色には、メガネの反射防止コーティングやシャボン玉に代表される薄膜干渉による色、レーザー鏡や包装紙などにみられる多層膜干渉による色、オパールに代表されるフォトニック結晶による色、CDなどにみられる回折格子による色、それに、青空の原因となる散乱による色がよく知られている。

3. 自然界の構造色

3.1. モルフォチョウの構造色

自然界の構造色では光のさまざまな性質が巧みに

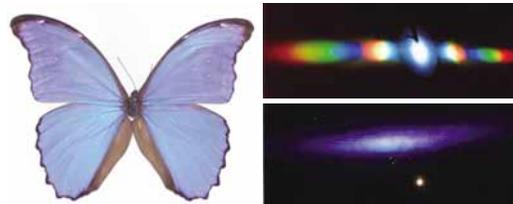


図1 ディディウスモルフォ(左)の2種類ある鱗粉の透過パターン(右上:上層鱗)と反射パターン(右下:下層鱗)。
[S. Yoshioka et al., J. Opt. Soc. Am. A23, 134-141(2006)より転載]

組み合わせられて独特の色合いをつくりだしている。例えば、モルフォチョウという中南米原産のチョウの雄は輝くような青色をしている(図1左)。その理由は、雌の注意をひくためであるとか、他の雄を排斥するためであるとか、飛翔する雄が鳥の目をくらすためであるなどと言われているがよくわかっていない。青色の原因は、翅に無数に存在する鱗粉にある。鱗粉は長さ0.2 mm、幅0.1 mm、厚さわずか3 μmほどの非常に薄っぺらな膜状の構造をしている(図2-a)。

鱗粉上にはリッジといわれる筋が約1 μm間隔に規則正しくついている(図2-b)。構造色の原因は、一見して、この規則正しい筋による回折格子であると思われるかもしれない。しかし、鱗粉に光を当ててみると実に不思議な現象に出くわす。この実験は簡単なので実験室でも試すことができる。普通のチョウでも規則正しいリッジをもっているのだから、その翅をスライドガラスに押しつけて鱗粉を付け、レーザーポインタのような平行光を当てるだけである。まず、透過光を観察してみると、透過したレーザー光の周辺にリング状の光が見えることだろう。リング状になるのはガラスに付いた鱗粉がいろいろな方向を向いているからで、鱗粉1つだけに当たると回折スポットが見事に見える(図1右上)。回折スポットのできる位置は鱗粉の位置やチョウの種類により異なり、2次以上の回折光まできれいに見える場合もある。回折角から回折格子の公式を用いて、筋の間隔を導出することができる。

これに対して、反射光を観察してみると、モルフォチョウの場合、透過光とはまったく異なる振る舞いを示すのである。図1右下にはそれを示すが、鱗粉1枚に白色光を当てると反射光は青く、筋に垂直な方向に細長く反射されるだけである。まったく回折スポットが見られないのである。これはどうい

ことだろう。つまり、筋と筋の間は回折格子の役割を果たすのだが、筋自体は回折格子になっていないのである。モルフォチョウの構造色でもっとも重要な点がここにある。この秘密は筋の電子顕微鏡写真を見るとよくわかる。単なる筋と思っていたものは、中心に柱をもち、柱の両側に柵が数段、規則正しく突きだした構造をしているのである(図2-c, 2-d)。ちょうど図書館の柵のような構造をしているので、「柵構造」とよぶことにしよう。柵と柵の間隔は0.2 μmなので、柵と空気の間隔を1層と考え、多層膜干渉の公式を用いると、

$$2nd=2 \times \text{平均屈折率} (\approx 1.2) \times 0.2 \approx 0.48 (\mu\text{m})$$

の色、つまり青色が選択的に反射されることがわかる。青色の構造色の原因がこの柵構造にあることは明らかである。

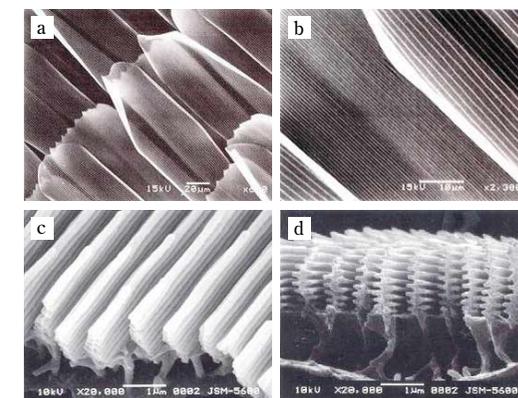


図2 ディディウスモルフォの2種類ある鱗粉(a-上層鱗, b-下層鱗)と下層鱗の切断面の走査型電子顕微鏡写真(c, d)。
[S. Kinoshita et al., Proc. R. Soc. Lond. B269, 1417 (2002)より転載]

それでは、柵構造が並んでいるのに、なぜ回折スポットができなかったのだろうか。電子顕微鏡写真がその問いに答えてくれる。つまり、柵は鱗粉の基板に斜めについていて、しかも柵が上に突きだした部分がランダムに分布しているのである(図2-c)。もしそうであるなら、鱗粉断面では、筋の高さは柵1段分のばらつきを生じることになる。これはちょうど光の1波長分に相当するので、筋で回折された光は、いろいろな位相の光波の足しあわせとなり回折スポットができないのである。このことはモルフォチョウにとっては都合がよいことで、特定の方向だけでなく、どこから見ても青色が見えることを意味している。

つまり、モルフォチョウは、柵構造という規則

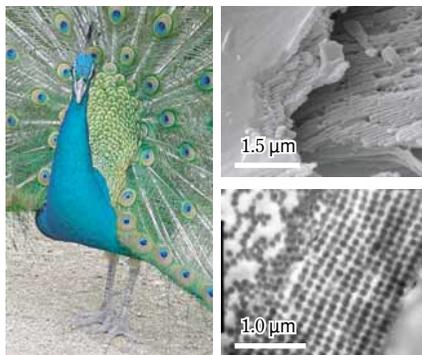


図3 クジャクの羽根の小羽枝の縦断面(右上)と横断面(右下)の電子顕微鏡写真。
[S. Yoshioka and S. Kinoshita, FORMA 17, 169 (2002)より転載]

的な構造による多層膜干渉で青色を強め、筋状の細かい構造による回折効果で筋に垂直な方向にだけ光を広げ、さらに、筋の高さを乱雑にさせることで回折スポットができないようにしているのである。筋に垂直方向にだけ光が広がる効果は、チョウが羽ばたいているときに一瞬だけ光るといふ点滅効果を促進させる。さらに、鱗粉の下部にはメラニン色素を含んでおり、青色以外の余分な光を吸収し、青色のコントラストをあげているのである。1枚の鱗粉の中に、よくぞここまで精密なしくみを入れたものだと感心してしまう。このように、規則的な構造により特定の色を強め、不規則な構造により拡散光をつくるしくみは、自然界の構造色で広く取り入れられている基本的な構造である。つまり、この2つの相反する効果をバランスさせているというところに自然の妙味があるのである。

3.2. クジャクの構造色

次に構造色のもう1つの代表である、クジャクの羽根のしくみを見てみよう。鳥の羽根は中心の羽軸とそこから枝分かれした羽枝、さらにその羽枝からは毛のような小羽枝が生えている。クジャクの羽根の色のしくみは、その小羽枝の内部にある。図3右には小羽枝の内部を示すが、内部には長さ0.7 μm、直径0.13~0.15 μmの円筒状の粒子が、間隔0.15~0.19 μmで10層ほど正方格子状に並んでいる。こうした構造を、現在では2次元フォトニック結晶とよんでいる。多層膜構造と比べると、円と円を結ぶいろいろな方向の面での反射を考慮ことができ、多層膜の改良版ともいえる構造である。

クジャクの羽根のさまざまな色は、格子間隔を変えることで実現している。円筒状粒子の正体はメラニン顆粒で、規則構造としての格子の役目とコントラストをあげるための色素の効果をあわせもっている。それでは拡散光をつくるための不規則構造はどこにあるのだろうか。円筒状粒子は、小羽枝の伸びている方向(図3右上)にはむしろ乱雑に配列しているので回折効果が期待できるが、それよりも、クジャクの小羽枝が三日月状に湾曲し、さらに根元からねじれた構造をとっている方が大きな効果を与えている。つまり、クジャクは光の回折だけではなく、マクロな構造を使って拡散光をつくりだしているのである。

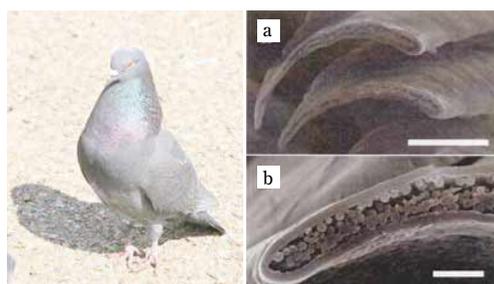


図4 カワラバトの小羽枝の断面の走査型電子顕微鏡写真。スケールバーはa-20 μm、b-3 μm。[S. Yoshioka et al., J. Phys. Soc. Jpn. 76, 013801 (2007)より転載]

3.3. ハトの構造色

モルフォチョウやクジャクの羽根のような巧みな構造と違って、ハトは実に単純な構造により独特の色を演出していることが、最近、吉岡らの研究でわかってきた。ハトの首の羽根は構造色独特の輝きをもっているが、不思議とどこから見ても、緑と紫に見えるだけで中間色が見えない。大抵の構造色が、見る方向を変えると徐々に色が変化していく点と大きく異なっている。そのしくみを調べるため、小羽枝の断面を電子顕微鏡で調べてみた。図4にその結果を示すが、小羽枝の内部は直径0.5~0.9 μmの球状のメラニン顆粒が詰まっているが、見るからにランダムであるので光の干渉には寄与せず、コントラスト増強にだけ寄与しているのだろう。

光の干渉に寄与しそうなものは、顆粒の入っている袋の膜だけである。膜は均一性が高く、その厚さ $d=0.5 \mu\text{m}$ である。したがって、単純な薄膜干渉と考えるしかないだろう。図5左には、膜の屈折率 n を1.5として、この厚さの膜の場合、薄膜干渉によ

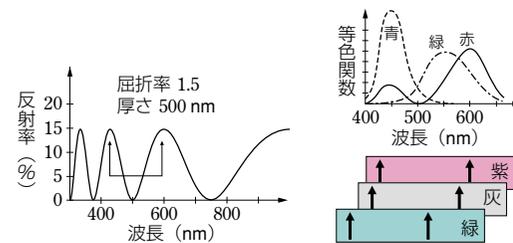


図5 高次の薄膜干渉により、ハトの羽根が緑と紫だけに見えるわけ。左は薄膜による反射スペクトル。右は0°(紫)、15°(灰)、30°(緑)入射の時の反射のピーク位置とヒトの等色関数(右上)を比較したもの。

る反射スペクトルを示す。 $2nd\cos\theta = (m - \frac{1}{2})\lambda$ の関係から、垂直入射では可視光領域(380~770 nm)で、 $m=3$ と4の2つの反射ピーク(428 nmと600 nm)が生じることがわかる。実際、ハトの羽根で測定してみると、確かに2山を示している。つまり、ハトの羽根の色は高次の薄膜干渉の色なのである。それでは、なぜ緑と紫の2色だけしか見えないのだろう。それを説明するには、ゲーテの色の話にもどる必要がある。色は光の物理的な性質により分けられる場合と、それを目で見てどう感じるかという2つに分けられることを述べた。物理的性質で分けたものが反射スペクトルであり、それをどのように人が感じるかは、ヒトの視感度曲線を調べる必要がある。図5右には3原色に相当する視感度曲線(等色関数)を示す。これをハトの羽根の反射スペクトルと合わせてみると、428 nmと600 nmの2つの山がちょうど、青と赤の視感度のピークにあうことがわかる。つまり、紫に見えるのである。少し斜めから見たらどうなるだろう。例えば、15°斜めから見ると、ピークはそれぞれ413 nmと580 nmに移って、感じる色は、青が少し、それに赤と緑の中間なので、それぞれが少しずつほぼ均等に検出される。このとき光があまり強くないならば、目には灰色に見えることだろう。もっと斜めから見ると、例えば、30°では371 nmと520 nmになって、今度は緑だけが検出されることになる。さらに、斜めにすると、今度は $m=2$ のピークが赤側から入ってきて、同じことが繰り返されることになる。つまり、ハトの羽根は紫→灰→緑→灰→紫と繰り返され、中間色が見えないのである。首の緑の部分は、反射光がちょうど緑になるような厚さになっている。

結局、高次の薄膜干渉を使うこと、それに反射スペクトルの山と山との間隔がちょうど視感度の両端

の色にあっていること、これがポイントである。単純な薄膜干渉であっても、見る側の視感度を利用して、独特の色をつくりだしているのである。見る方向により2色が突然入れ替わることは、色が徐々に変化するより、視覚効果が大きいと考えられる。ちなみに、鳥の視覚は紫外も合わせて4原色になっているが、オールドロップという色フィルタが入っているため、色の識別がさらに容易になっている。ハトの反射スペクトルを鳥の場合に当てはめてみると、紫外をのぞいた可視域についてはヒトよりもさらに適合性がよさそうだが、本当のところは鳥に尋ねてみるしかない。

構造色は自然がつくりあげた宝箱である。この中には光のさまざまな作用が詰まっている。自然はその進化の過程で実に多様な試みをしてきたが、その中で現在までに調べられたものはほんの一部にすぎない。身の回りの工業製品のほとんどが、最も簡単な薄膜干渉を基礎につくられていることを考えると、私たちはもっともっと自然に学んでいかなければならないだろう。

更に詳しく知りたい方は次の文献をご参照ください。また、手元に論文の別刷りがありますのでご請求ください。

(skino@fbs.osaka-u.ac.jpまで)

- 1) 全般的に知りたい方
木下修一『モルフォチョウの碧い輝き』(化学同人, 2005)
"Structural Colors in Biological Systems - Principle and Applications" (大阪大学出版会, 2005)
S. Kinoshita and S. Yoshioka, ChemPhysChem 6, 1443 (2005).
構造色研究会ホームページ:
<http://mph.fbs.osaka-u.ac.jp/~ssc/>
- 2) モルフォチョウに関する論文
S. Kinoshita, S. Yoshioka and K. Kawagoe, Proc. R. Soc. Lond. B269, 1417 (2002).
S. Yoshioka and S. Kinoshita, Proc. R. Soc. Lond. B271, 581 (2004).
S. Yoshioka and S. Kinoshita, Proc. R. Soc. Lond. B273, 129 (2006).
- 3) クジャクに関する論文
S. Yoshioka and S. Kinoshita, FORMA 17, 169 (2002).
- 4) ハトに関する論文
S. Yoshioka, E. Nakamura and S. Kinoshita, J. Phys. Soc. Jpn. 76, 013801 (2007).

本記事のカラー写真は、弊社ホームページからご覧いただくことができます。

<http://www.chart.co.jp/>
トップページ→教科の広場→理科・サイエンスネット