

モルフォチョウの青の秘密



技術解説

木下 修一*, 池田 一彦, 川越 健司, 平田 久仁子

Mechanism of structural color in *Morpho* butterflyKey Words : *Morpho* butterfly, Structural color, Diffraction, Interference

1. はじめに

抜けるような空の青さ, 深い海の碧, 雨上がりの虹, 自然は色に満ち溢れている. これら自然現象の中で見られる様々な色は忙しい私たちに安堵の時間を与えてくれる. 生物界も, 真珠の色, 孔雀の羽, カワセミのコバルトブルーの羽, 玉虫の翅, それに, ここで扱うモルフォチョウの翅など色とりどりである. 進化の産物とはいえ, いったいどのようにしてこのような色が発生したのだろうか.

自然界の色には分子や固体のそのものの電子的な性質が関わっている場合とそのものには色はないが光の波長あるいはそれ以下の微細な構造を持つことにより色がつく場合がある. 後者は構造色といわれシャボン玉の色などがそれにあたる.

構造色は現代科学の先端技術でもなかなか実現できないような微細な構造に基づく色であるが, 実は, 自然界にそのような「色」が現れたのは前者の「色」よりもずっと古く, 今から5億年も前のカンブリア紀にまで遡ることが最近の化石の調査から推測されている¹⁾. それによればカンブリア紀の動物の化石にすでに光の波長程度の周期構造が見られ, 干渉により色を作り出し, 白黒の世界にいた生物に色覚の発達を促したというのである. 我々にとって身近な色素による「色」はこれより後の分子進化の産物であるらしい. もし真実であるとすればダイヤモンド

や真珠, 玉虫の色などなどわれわれが輝く色合いを愛するのは太古の自然へのあこがれということだろうか.

筆者の一人(木下)は光の研究の傍ら, 昆虫採集を趣味に持ち, 昆虫のもつ色合いの不思議さに心を奪われてしまった. 調べてみると, これまでにも著名な科学者が構造色に興味をもち研究をしていることが分かった. マイケルソン²⁾やレイリー³⁾の実験で有名なマイケルソン²⁾やレイリー散乱で有名なレイリー³⁾もその例である. また, 最近では繊維会社や自動車会社でも研究が進められていて^{4,5)}, 現代の科学技術を駆使してこの色を再現し, 衣服や車のボディの色に応用している. しかし, 生物の模倣と言う意味での発展はあるものの, その機構の本質的な解釈については意外に進んでいない⁴⁻⁷⁾. そこで, 中南米にすむ大型の蝶の一種モルフォチョウを例にとり, その構造色の仕組みを調べることにより, その本質に少しでも迫り, 太古の偉大な自然の産物の一端に触れてみたいというのが本稿の主旨である.

2. モルフォチョウの観察

夏休みの「世界の昆虫」展などで必ずといってよほど登場するのがコバルトブルーのモルフォチョウである. モルフォチョウを見つけたら, 是非斜めからと横からとから見てほしい. 色が変わって見えたり輝きに方向性があるのが分かるだろう. こうした色や輝きに方向性をもつことが構造色の一つの特徴でもある. また, 翅にアルコールなどの液体をかけると, 青色が緑色に変化して見えることも分かる(こんなことをすると係員に怒られてしまうが). モルフォチョウにもいろいろと種類があり, 濃い青色を示すもの(*Morpho didius* など)や透き通るような色合いのもの(*Morpho sulkowskyi*)などさまざままで, 真夏の一日を童心にかえり楽しく過ごすことができる.



* Shuichi KINOSHITA
1949年7月11日生
1977年東京大学理系大学院化学専門
課程・博士課程修了
現在, 大阪大学大学院・理学研究科・
物理学専攻, 教授, 理学博士,
レーザー分光学
TEL 06-6850-5366
FAX 06-6850-5366
E-Mail skino@phys.sci.osaka-u.
ac.jp

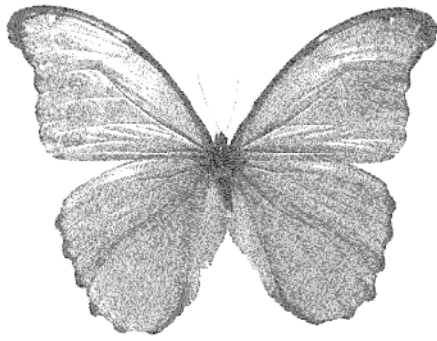


図1 *Morpho didius* の標本写真

図1は*Morpho didius*の標本写真である。この蝶は翅を広げると17-8cmほどにもなる大型の蝶で、雄はみごとなまでのブルーである。この蝶の翅は $50 \times 100 \mu\text{m}^2$ くらいの多くの鱗粉で覆われている。モルフォチョウの構造色の仕組みはその特徴ある鱗粉に存在している。*Morpho didius*の表面は2重の鱗粉で覆われていて、上側をcover scale、下側をbasal scaleと呼んでいる。この2種類の鱗粉は互い違い

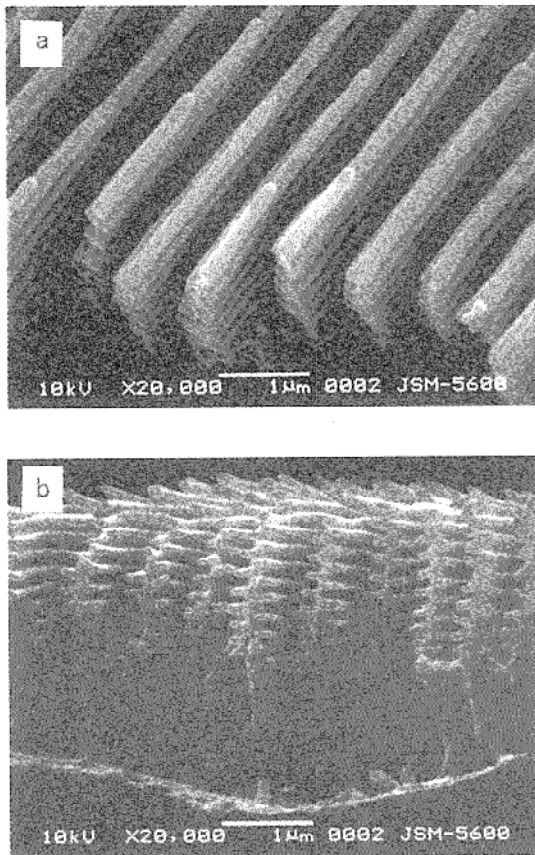


図2 *Morpho didius*のbasal scaleのa)断面の斜めから及びb)断面の走査電子顕微鏡写真。

についているが、構造色の大部分を担うものはbasal scaleである。図2に走査電子顕微鏡で観察したbasal scaleの構造を示す。basal scaleには $0.7 \mu\text{m}$ 間隔の筋(ridge)が鱗粉の長軸にそって規則正しく並んでおり、さらにそれぞれの筋には $0.2 \mu\text{m}$ 間隔のクチクラからなる柵構造が数段見られる。こうした柵構造は外見上異なったように見える*Morpho sulkowskyi*でも同様で、モルフォチョウの構造色の特色といえるだろう。

3. 光学測定

モルフォチョウの輝きや色合いを定量的に調べてみよう。試料としてチョウの翅をそのままつかったり、1個の鱗粉だけにして裏面の鱗粉や鱗粉が重なった場合の効果を取り除いて試料にし、レーザー光や白色光をあて光学的な性質を調べてみた。図3は鱗粉に垂直に光を入射し、垂直に反射する光の強度を測定した反射率の測定結果であるが、我々の視覚を裏付けるようにbasal scaleでは480nm周辺の青い光を効率良く反射していることが分かる。反射率はすべての角度で積分すると数十%にもものぼる。cover scaleはこれに対してわずか10%の反射に過ぎない。この2つの鱗粉では柵構造はほぼ等しいが、筋の間隔は約2倍ほどcover scaleの方が広い。

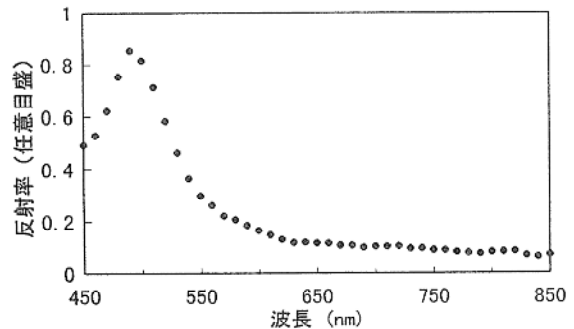


図3 *Morpho didius*の単一basal scaleでの反射スペクトル

図4は接着テープを用いて翅からcover scaleを取り去り、basal scaleだけを露出させた試料を用い、垂直入射による反射強度の角度依存性を調べたものである。これによれば450nmより長い波長ではほぼ垂直方向に強く反射しているが、それよりも短い波長では垂直方向の強度が減少していき、60度ほど傾いた方向に強く反射していることが分かる。この結果は翅を斜めから見ると紫色に見えることに対応している。短波長で0度近傍にあるピークは

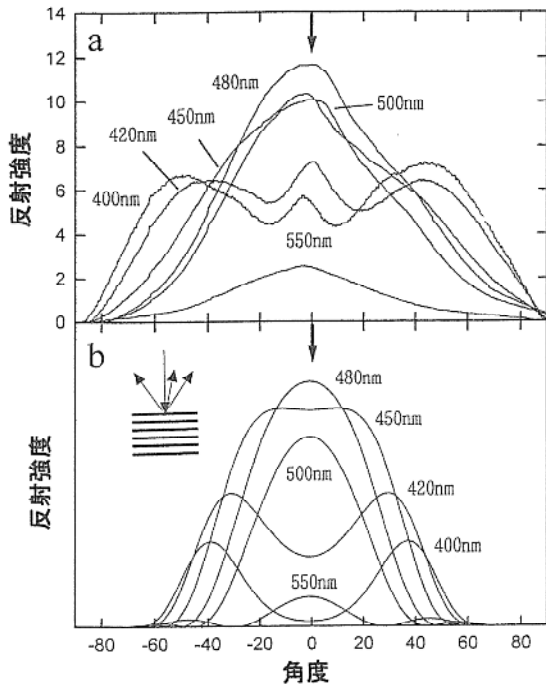


図 4 a) *Morpho didius* の basal scale へ垂直に光が入射したときの反射強度の角度依存性, b) モデル計算の結果

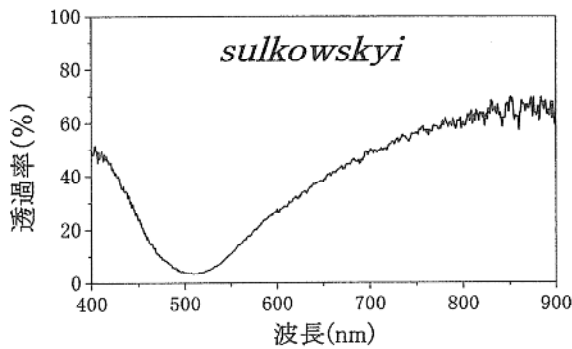
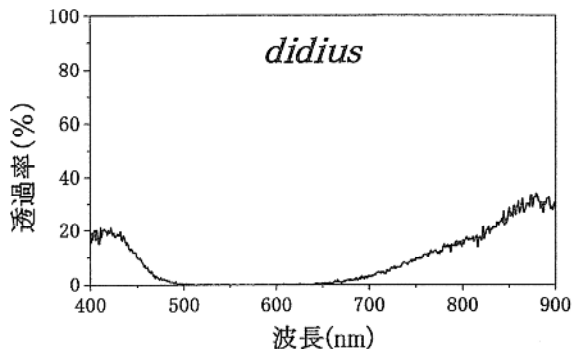


図 5 a) *Morpho didius* と b) *Morpho sulkovskyi* の単一鱗粉での透過スペクトル

coherent backscatteringに基づくもので、不規則な構造に入射した光がそのまま進行した道筋をもどって散乱される現象である。

図 5 は *Morpho didius* の 1 個の basal scale で測定した透過スペクトルであるが、480nm より長い波長でもほとんど光は透過せず、この波長領域に強い光吸収や散乱があることを示唆している。一方、*Morpho sulkovskyi* では吸収は少なく、この違いが *Morpho sulkovskyi* での見た目の透明感を与えていると思われる。

4. 構造色の仕組み

モルフォチョウの構造色は、1) 青色を強く反射する、2) 青色は角度によりあまり変化しないが、さらに斜めから見ると紫色に見える、3) きらきらとした輝きがある、という 3 つの特徴でまとめることができる。電子顕微鏡観察と光学測定の結果から、これらモルフォチョウの構造色の仕組みを解き明かしてみよう。

モルフォチョウの構造色は鱗粉上の筋とそれに付属した柵構造に基づくことは明らかである。そこで図 6 に示すようなモデルを考え、その特徴を再現してみよう。もし、図 6a のように全く同じ柵構造が等間隔に並んでいるとすると、その周期に相当する回折光が現れ、光は特定の方向に強く回折するはずである。実際は図 4a に示すように光の反射効率は反射角度に対してなめらかに依存するだけである。このことから 1 つ 1 つの筋で回折した光の間にはコヒーレンスが保たれていないことが分かる。このことは、図 2 の走査電子顕微鏡写真からも見る事ができる。柵は鱗粉の基部方向から斜上しているが、

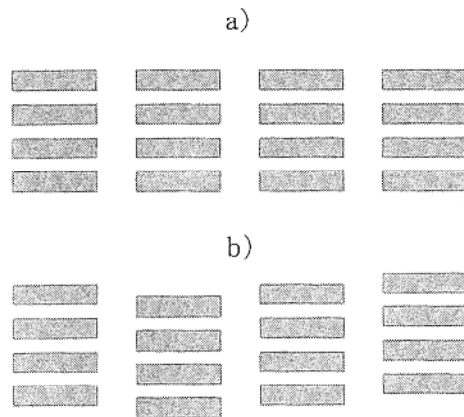


図 6 a) 周期的な柵構造のモデル b) 柵構造に高さの乱雑さがある場合

筋間の規則性はなく、その結果鱗粉の筋に垂直に切った断面で見ると、棚構造は上下方向に一段分程度の高さの乱雑さをもっていることが分かる。このような不規則性がある場合には、多くの筋からの回折光の干渉は結果として打ち消し合い、それぞれの筋を回折した光強度の和として振る舞うことが知られている。それならば一つの棚構造だけに注目し、その反射強度、角度変化を調べてみよう。

複雑な棚構造と光との相互作用の特徴をつかむため、各段の厚さは無限に薄く、また、入射光は各段において損失すること無しに考えている段にまで到達するとしてモデルを考えた。また、回折光が他の段により再び回折する効果も無視した。これらの近似は複雑な形状の誘電体の存在する空間での波動方程式の一次近似解になっている。計算結果を図4bに示すが、簡単なモデルにも拘わらず、鱗粉の光学的な特徴をよく表していることが分かる。つまり、480nmのあたりで垂直方向にもっとも強く反射し、短波長になるにつれ、垂直方向の反射が減り、50度あたりの角度への光の回折が強くなっている。このように短波長で垂直方向の回折強度が弱くなるのは、各段からの回折光が干渉の結果互いに打ち消し合っている効果によるものである。中心付近のcoherent backscatteringは筋間の不規則性と多重散乱の効果を入れていないため図では現れてこない。

このようにモルフォチョウの構造色の特徴は1) 筋の中での周期的な棚構造と2) 隣り合う棚構造間の不規則性の2つの効果によって説明されることが分かった。鱗粉の絶対反射率については筋の間隔が重要な役割を果たしている。これを説明するため、図6aに示すように左右に隣り合う棚構造を考えると、クチクラと空気が交互に並ぶ周期構造をなしていることがわかる。このような周期構造に外部から光が入射すると、周期構造の内部にはこの周期に対応する電場が生じるが外部の場がこの周期に一致しない限り、直接この周期構造内の場と結合することができない。合致しない場合には、周期構造を空間的にフーリエ分解した成分のうち0次の成分(すなわち、クチクラと空気の間隔)として外からは見えるので、クチクラと空気の間隔に依存した平均屈折率をもつ連続した誘電体多層膜として振る舞うと考えられる。

そこで、実際の筋の間隔と棚構造の大きさをを用い、クチクラと空気の屈折率をそれぞれ1.6, 1.0として

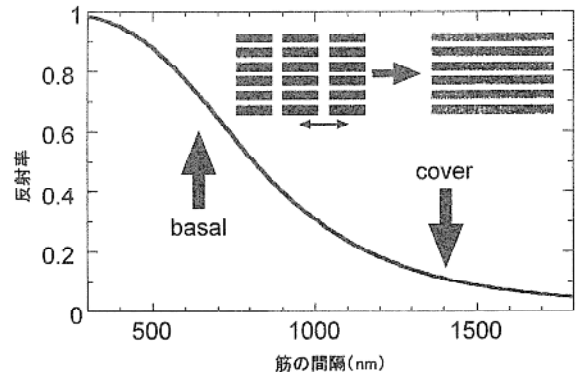


図7 クチクラの棚構造をもつ筋の周期を平均の屈折率をもつ誘電体多層膜に置き換えた時の反射率。矢印は basal scale と cover scale の筋の間隔に相当する。

誘電体多層膜での反射率を計算したものを図7に示す。図の中の矢印はbasal scale, cover scaleに該当する筋の間隔を表している。反射率はそれぞれ60%, 10%となり実測値ともかなり良く一致している。言い換えれば、反射率は筋の間隔を粗密にすることで調整できるのである。さらに、翅全面で見られるきらきらとした輝きは棚構造で波長を選ばれた光が多く筋で位相を乱雑にして回折して空間的に偶然干渉し合うというスペckルによって説明できると考えられる。

5. ま と め

このようにモルフォチョウでは干渉と非干渉を実にうまく組み合わせて、強い反射ときらめきを同時に得ようとする構造をとっていることが分かる。このような構造は、自然界にはタマムシなどの甲虫などにも見られ、むしろ積極的に空間的な一様性を壊すことにより、宝石のような輝きを与える効果をねらっている節がある。さらに、モルフォチョウでは干渉に携わらない余分の光を色素によって吸収しコントラスト上げているようである⁴⁾。このことは図5の透過スペクトルを青色のくっきりした *Morpho didius* と青色が薄い *Morpho sulkowskyi* を比べることで理解することができる。このように、自然界の鮮やかな色合いは干渉と非干渉を組み合わせた複雑な構造色とそれを助ける色素の共同作業として説明されそうである。

波長より小さい周期的な微細構造は最近の物理学でのフォトニック結晶の議論と合い通じている。モルフォチョウも原理的にはフォトンギャップに相当

するエネルギーの光を反射していると考えられなくもないが、フォトニクス技術としてのフォトニック結晶の議論とは異なり、自然界の構造色の場合むしろ規則性に組み合わせた不規則性を積極的に使って、刺激的なきらめきを作っているようである。まったく自然の奥深さには驚くほかない。

謝 辞

なお、この研究の一部は村田学術振興財団の援助を受けたものである。また、走査電子顕微鏡に関しては日本電子(株)関西応用研究センターの高木滋夫氏、磯野晶雄氏にお世話になった。ここに感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) A. R. Parker, Proc. R. Soc. Lond. B265, 967-972 (1998).
- 2) A. A. Michelson, Phil. Mag. 21, 554-566 (1911).
- 3) Lord Rayleigh, Phil. Mag. 37, 98-111 (1918).
- 4) H. Tabata, et al., Opt. Rev. 3, 139-145 (1942).
- 5) 窪津彰, 安井昭夫, 化学 43, 107-111 (1988).
- 6) H. Ghiradella et al., Science 178, 1214-1217 (1972).
- 7) H. Ghiradella et al., J. Morph. 142, 395-410 (1974).
- 8) 吉田昭広, インセクタリウム 29, 14-18 (1992).

