3 昆虫による色情報の生成と利用

木下 修一 大阪大学大学院生命機能研究科

多様な昆虫の世界で色情報がどのように生成され，利用されているか概説する．ここでは特に，微細構造が関係した発色現象に着目した．微細構造が生み出す「構造色」の例として，タマムシ，コガネムシ，モルフォチョウなどの多層膜構造，マエモンジャコウアゲハなどのフォトニック結晶，さらに，イトトンボに見られる乱雑な構造がつくる色について詳述する．また，色素による発色も単に色素だけではなく，ミクロな構造が深く関係していることをモンシロチョウの白，キチョウの黄色，アゲハチョウの黒などの例をあげて説明する．これらの色情報は，メスやオスに対するアピールであったり，捕食者に対する警戒や隠ぺいなどさまざまに利用されている．

■ 多彩な色の世界

昆虫には100万種を超える種類がいるという．さらに，毎年3千種ずつ増えているというから，本当はどのくらいの種類がいるのか見当もつかない．この数は，鳥の1万種，魚の1万8千種に比較すると途方もなく大きく，2番目に種類の多い軟体動物の11万種と比較してもずば抜けて多いことが分かる．海の中を除いて，昆虫はいたるところに生息している．この種類の多さと生息環境の多様さが，進化の過程でさまざまな環境に適応した，数限りない多様性を獲得させてきたのであろう．昆虫を彩る多彩な色もその多様性の表れである．昆虫の体，翅（はね），毛はほとんど例外なく何らかの色で彩られている．本稿では，この昆虫を彩る多様な色がどのように作られ，そして，それはどのような意味を持つのか，概説したい．

まず，色について触れる必要があるだろう．色とは何かという問題を物理的に解明したのは，Newtonである．Newtonは，太陽からの白色光をプリズムに導き，それがいろいろな色に分かれることを実験的に示した．さらに彼は，分かれた光を再びプリズムで重ねると白色光になることを示したのである．この実験の物理的な意義は大きい．白色光と思っていたものは，実はさまざまな色の集まりであったこと，および，色は光がプリズムをどのくらいの角度で曲がるかという物理現象であることを示したのである．現在では，光は電磁波の一種で，色の違いはその波長の違いとして理解されている．つまり，波長の短い光が青色で，長い光が赤色だというわけである．プリズムを曲がる角度の違いは，プリズムをつくる材質の屈折率が波長により異なるという分散を示すからである．

一方，このような色の物理的な解釈に対して，詩人であり科学者でもあったゲーテは反対した．彼は色が人間の心理の中で作られるものであると主張したのである．彼の主張の根拠は，ろうそくの赤い光をずっと見続けて，ふっと白い布を見るとそこにはもともとなかった緑色がうっすら見えるという実験事実によっている．つまり，もともとない色でも人間の心の中で作られるということを示したのである．この現象は現在では，順応という言葉で知られていて，特定の色を見続けていると，それを検出する錐体という視細胞が一時的に検出できなくなることによっている．三原色のうち赤色が見えなくなると，白い色は，補色の緑のように見えてしまうというわけである．これとは別に，同じ色であっても，その背景色によりまったく異なる色に見えることがあり，錯視の顕著な例として知られている．錯視は色や形の認知を行う脳の機能と密接に結びついていて，脳の中にあるプログラムにより色や形の判断がなされていることを示している．

このように単に色情報といってもいろいろな側面があり，問題は複雑になっていくが，これから「色」というときには，とりあえず「物理的な色」を指して呼ぶことにしたい．しかし，「色情報」という限りは，色情報を出力する側とそれを入力する側があるのだから，たとえ物理的には同じ色の光が放たれていても，その周りの環境やそれを受け取るものにとっては異なった色として判断されているかもしれないという認識は常に持つ必要がある．このことは昆虫についても成り立つことなのだが，残念ながら昆虫の視覚についてはよく分かっていないし，ましてや脳の認知機能については全然分からない．したがって，昆虫の作る色が生物的にどのような意味を持つかという問題は，どうしても推測になってしまう．

■ 色情報の生成

❖ 構造色とは

それでは，色は自然界でどのように生成されているのだろうか．色を生成する仕組みには大きく分けて 2 つある．太陽からの白色光が物体に当たって色づいて見えるのは，白色光に含まれるさまざまな色の光のうち，特定の色の光だけが物体により反射あるいは透過することによって，目に入ってしまうからである．残りの光は一般には物体に吸収され，吸収された光は結局熱になってしまう．これが，第 1 の仕組みである．この仕組みでは，光のエネルギーが熱エネルギーに変換される過程で色が見えると言ってもよいだろう．我々の身の回りにある色は，ほとんど光の吸収を伴っているので，この仕組みによっていると言ってよい．色を吸収するものとしては，色素や染料などの有機物や，顔料などの無機物，そして金属のこともある．

もう 1 つの仕組みは，何らかの機構によって，白色光のうち特定の色の光だけが目に入るようにする方法である．この仕組みでは特に光を吸収するものがなくても，必然的に色がついて見えることになる．そのためには何らかの構造が必要で，プリズムはその 1 つの例だと言える．そのほかにも，メガネの反射防止膜やシャボン玉のように薄い膜によっても光は薄膜干渉を起こし，特定の色の光だけを反射するから色がつく．薄膜干渉だけでなく，膜が多層に重なった多層膜干渉はさらに強い色を生成する仕組みである．多層膜干渉は，高分子フィルムや光を 100% 反射することのできるレーザーミラーなどに実際使われている．構造が平面上に規則正しく並んでいて色がつく現象は，回折格子という名前で呼ばれていて，CD や DVD の色でおなじみである．さらに，構造が規則正しく立体的に配列したものはフォトニック結晶と呼ばれ，エレクトロニクスに代わる次世代技術として盛んに研究されている．自然界でもフォトニック結晶は広く分布していることが最近分かってきた．宝石のオパールはその代表で，球形のシリカが規則正しく最密充填した結晶構造をとっている．多層膜でも回折格子でもフォトニック結晶でも，規則正しく配列した構造は，光の干渉をもたらし，干渉条件に合う光だけを強め，逆に合わないものを弱めてしまう．このような仕組みによる着色は，干渉により強く発色すると同時に，見る方向により色が変化するという方向性を持つことになる．

一方，構造の規則性がなくても着色するものもある．微粒子が分散した系がうっすらと青色を帯びるのはチンダルブルーとして知られているが，散乱効率が波長によって変化することが原因である．微粒子の大きさが光の波長より十分小さいとレイリー散乱☆1 が起きて，もっぱら青色の光が散乱される．空の青さの原因がこれである．また，粒子の直径が光の波長と同程度になるとミー散乱☆2 が起きて，特定の波長の光が散乱されやすくなる．火星の夕日が青いのは，大気中に光の波長程度の大きさの粒子が多いため，大気中を通過する間に赤い光が散乱され，青色だけが見えるためだと言われている．散乱による着色は散乱効率の波長選択性が低いため，着色の仕組みとしては弱いが，青空に代表されるような，方向に依存しない独特の色を呈することが特徴である．

構造による色は吸収による色に対比させ，「構造色」または「構造発色」と呼ばれている．しかし，吸収による色と構造色は一般に独立なものではなく，自然界では，構造色は色素の働きを借りてその色をより鮮やかに見せているし，色素は構造の助けを借りてより効率よく着色しているのが普通である．

❖ 昆虫の構造色

(1) タマムシ

昆虫の中で，鮮やかな構造色を示す種の代表はコガネムシやタマムシが含まれるコウチュウ目とチョウとガが属するチョウ目である．まず，構造色を示す甲虫の代表としてタマムシをとりあげる．

タマムシはタマムシ科に属する昆虫を一般に指しているが，我々がタマムシだと思っている種はヤマトタマムシと呼ばれる種である（図 -1 左）．甲虫の上翅は，一般に硬い鞘翅（しょうし）でできているが，タマムシの鞘翅は赤い帯の入った緑色を呈し，その体は赤胴色の金属的な光沢を示している．日本や朝鮮では，6 世紀から 8 世紀頃にかけて，タマムシの鞘翅は，玉虫厨子や鞍・太刀

☆1 微粒子の大きさが光の波長より十分に小さいと青色の光が等方的に散乱される現象．
☆2 粒子の直径が光の波長と同程度になると，特定の波長の光が前方に強く散乱される現象．

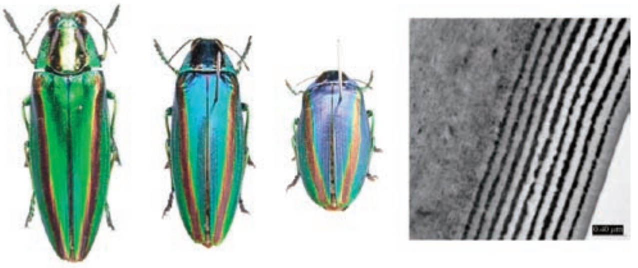

図 -1　見る角度により色の変わるヤマトタマムシ（左）とその鞘翅断面の電子顕微鏡写真（右：浜松医科大学　針山孝彦氏提供）．スケールバーは 400nm.

の装飾としてしばしば用いられてきた．タマムシの翅を拡大してみると，甲虫特有の点刻と呼ばれる 50μm くらいの直径の穴が多数空いている．さらに，拡大すると 10μm 程度の 5 角形や 6 角形の模様でびっしり埋め尽くされている．しかし，これらの構造は直接色とは関係せず，色の仕組みは鞘翅の断面にある．そこで，断面を透過型電子顕微鏡で見てみると，電子密度の高い層と低い層が交互に並んだ層が表面に数 μm ほど分布していることが分かる（図 -1 右）．電子密度の高い層はメラニン色素を含む層だと言われ，含まないクチクラの層と交互に並ぶことにより多層膜を形成している．この層の周期に対する光学距離（距離×屈折率）と光の波長の 1/2 が一致すると効率よく光を反射することができる．実際に調べてみると 550nm 付近の黄緑色に対応する強い反射の存在を示すことができる．多層膜は斜めから入射すると，干渉条件が短波長にずれる．タマムシの標本を斜めにしていくと，黄緑色から濃青色まで徐々に色が変化していくのが分かるであろう（図 -1 左）．

タマムシの鞘翅の場合，表面にある多角形の模様は平面的でそのことが鏡のような輝きを与えるが，点刻による表面の凹凸は激しく，全体として光はかなり拡散されている．このことは，タマムシにとってはむしろ好都合で，正反射方向でなくてもその存在を示せるからである．同様な多層膜による着色はハムシ，オオセンチコガネなどで見られ，輝くような色の甲虫はたいていこの機構による発色であろう．同じような機構を持っていても，多角形の模様の部分が深く陥没しているハンミョウなどは，構造発色はしているものの角度依存性も輝きもあまり見られない．これも，それぞれの昆虫の生き残り戦略の表れと言えるだろう．

(2)コガネムシ

昆虫の体はクチクラという硬タンパク質を中心とした高分子でできており，分子の軸がらせん状に配列することが知られている．このらせんのピッチが光の波長に合うと選択反射が起き発色させることができる．このような原理で発色しているのがコガネムシの仲間である．表面に平行に並んだ分子軸が，表面から奥に向かって徐々に向きを変化させ，らせんを巻いたように配置している液晶をコレステリック液晶と呼んでいるが，コガネムシはコレステリック液晶と同じような配置をとっているのである．構造の規則性という意味では分子軸がらせん状に配列していても，らせんのピッチが周期となり，多層膜のように光は干渉することができる（一般的に，分子がある方向に並んでも，分子の向きまで揃っていないときには，ピッチの半分が周期になる）．このとき，らせんと同じ回転方向に光の電場の向きが変化していくと，その周期に対応した波長の光が反射されることになり，反射光は必然的に円偏光になってしまう．昆虫は左回りのらせんを持っているが，このらせん構造に光が照射すると，らせんのピッチに当たる波長の光のうち左回り円偏光の成分だけが反射されてしまう．したがって，コガネムシを右回り円偏光しか通さない偏光板を通してみると真っ黒になってしまうのである（**図 -2**）．

このように円偏光を反射するのは，甲虫の中でコガネムシやハナムグリの仲間だけである．タマムシなど，ほかの甲虫も同様のらせん構造を持っているのだが，らせん構造の上に多層膜構造があるので，多層膜構造で光は反射され，奥にまで入っていかないからである．中米にいるキンイロコガネは，このようならせんの層を 2 つも持っていて，しかもその間に一軸性の層を挟んでいる．そのため，上のらせん層を反射せずに透過した右回り円偏光の光を，一軸性の層で左回りに変え，下のらせん層で反射させたのち，再び，右回りに変えて，上のらせん層を通過させている．しかも，上と下のらせんのピッチが少し異なるので，全体として 70% に近い反射率を保ちながら，波長により円偏光状態が右回りだったり左回りだったりするのである．つまり，無偏光で見ると金色なのだが，右回りと左回りの円偏光板で見るとそれぞれ違った色に見えることになる（図 -2 右）．

(3)多層膜を持ったチョウやガ

多層膜構造はチョウやガにも広く分布している．チョウやガの翅は鱗粉という毛の変形した薄片で覆われている．鱗粉の大きさは，長さが 0.2mm，幅が 0.1mm 程度で，厚さはわずか 5μm しかない．チョウやガはこの薄い鱗粉を発色や撥水など多機能に利用しているのである．

チョウやガの翅は飛翔の道具であるのでできるだけ軽くしなければならない．そのため，鱗粉も見事なまでの透かし彫り状態になっている．この透かし彫りの鱗粉の下の部分を使って多層膜が形成されている．日本に生息するムラサキシジミは，鱗粉の下部にクチクラ 4 層と空気層からなる多層膜を形成している．ただし，最上層には胡椒ビンの中蓋のような穴がたくさん空いていて，光

図 -2　円偏光板を通して見たコガネムシ．左 2 枚は Plusiotis wolfi（プラチナコガネ）で，左側は偏光板なし，右側は右回り円偏光板を通して見たもの．右 2 枚は Plusiotis resplendis（キンイロコガネ）で，左は左回り円偏光板を，右は右回り円偏光板を通して見たもの．

図 -3　オビクジャクアゲハ（左）とニシキオオツバメガ（右）

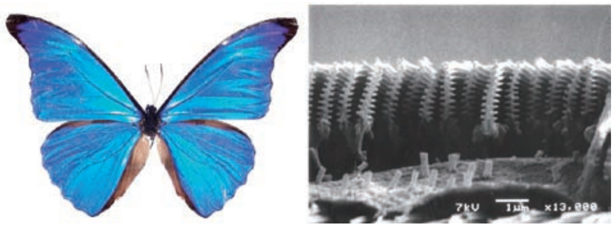

図 -4　レテノールモルフォ（左）および，その鱗粉の断面の走査型電子顕微鏡写真（右）[1]．スケールバーは 1μm.

を拡散するのに役立っていると思われる．ルリシジミはこの多層膜が網目のようになっていて，拡散効果の大きい構造になっている．

インドネシアに生息するオビクジャクアゲハという種類は翅の中央部分に緑色の帯を持っている（**図 -3** 左）が，この部分の鱗粉には直径 5μm 程度の半球状の窪みがたくさんあって，その窪みの壁に沿って多層膜が発達している．この窪みに光が当たると，窪みの中央部分では多層膜に垂直に光が当たるため黄色の光が反射し，窪みの側面に当たった光は反射され，もう一度反対側の側面に当たって入射方向に戻っていく．このとき，多層膜に対する入射角は大きくなるので，青色を中心にして反射することになる．入射方向から見ると，黄色と青が混ざり，結果として緑色に見えているのである．つまり，色混合が 5μm のサイズで起きていることになる．同様の機構は，マダガスカルに生息するニシキオオツバメガという種類でも見られる（図 -3 右）．このガは翅一面にさまざまな色が散りばめられていて，世界一綺麗なガと言われているが，このガの鱗粉は長軸方向に円筒状に湾曲していて，その湾曲に沿って多層膜が発達している．湾曲した曲面を持つ鱗粉は，隣同士の間でちょうどオビクジャクアゲハと同じような原理で色混合を起こし，さまざまな色を出すのに役立っている．

(4)モルフォチョウ

多層膜の変形とも言える複雑な構造をとっているのが，モルフォチョウと呼ばれる中南米に生息する大型のチョウである（**図 -4** 左）．このチョウは輝くような青色を呈するので，100 年も前から科学者の注目の的であった．青い部分の鱗粉の上部にはリッジと呼ばれる筋が約 1μm 間隔で平行に走っているが，このリッジにその仕組みが隠されている．図 -4 右に示すように，モルフォチョウの翅では，高いリッジの両側に規則的な棚（棚構造と呼ぶ）が 10 段ほど発達しているのである．全体としてみると，多層膜をリッジごとに切断したような構造をとっているので，多層膜干渉と切断したことによる回折効果が重なり，強い青色を広い角度で拡散する仕組みになっている．リッジの方向は翅の脈（翅脈）に沿って揃っているので，リッジに垂直な方向では光は大きく広がるが，平行な方向では正反射するので，反射する光は翅脈に垂直な青い光の帯を作るのである．このような独特の反射特性はチョウが羽ばたいたときにその効果を発揮すると考えられる．つまり，見ているものにとっては，チョウが羽ばたくたびに強力な光の帯が目をよぎることになり，点滅する光を感じることになる．これにチョウ特有の不規則な飛翔が重なるとき，きわめて捕捉しにくい対象となるだろう．同様な構造は，いろいろなチョウの鱗粉で見られ，たとえば，キチョウの仲間では同様の仕組みで紫外線を選択的に反射している．

(5)フォトニック結晶を持ったチョウ

南米に生息するマエモンジャコウアゲハは前翅の中央

図 -5　マエモンジャコウアゲハ（左）とモンシロチョウ（中），および，モンシロチョウ♂の鱗粉の走査型電子顕微鏡写真（右：大阪大学　吉岡伸也氏提供）．スケールバーは 1μm.

に緑色の紋があるが（図 -5 左），その部分の鱗粉の下部には規則正しい構造が詰まっている．その構造は面心立方格子をとるフォトニック結晶である．同様の構造はルビミドリコツバメと呼ばれる小型のチョウの裏面の緑色の部分で最初に報告され，生物が作った結晶構造であると注目された．その後，チョウ以外にも続々発見され，フォトニック結晶は生物界に広く分布することが分かってきた．クチブトゾウムシの仲間の鞘翅にある鱗片と呼ばれる鱗粉状の構造にもオパールと同様の結晶構造が見つかり，「動くオパール」として雑誌 Nature を騒がせたのも記憶に新しい．チョウの鱗粉やゾウムシの鱗片に，このような特殊な構造があるということはすでに 100 年も前から報告されていた．そのときは結晶状であることまでは分からなかったが，その構造が鱗粉全体では一様でなく数 μm のオーダーでその性質を変えるドメイン構造をとっていることが注目されていた．ドメイン構造は，フォトニック結晶の方位が場所ごとに変化する現象で，反射光を拡散することに役立っていると思われるが，詳細な光物理学的な研究はなされていない．

(6) トンボの水色

イトトンボの仲間には水色のものが多いが，水色の部分の表皮の内側には微小な球形粒子を数多く詰めた細胞が見つかっている．粒子の直径は 0.3μm 程度で，古くは微粒子による散乱がチンダルブルーを生成するとされていた．しかし最近，ランダムと思われていた粒子の分布に相関があることが報告され，物議をかもしている．粒子の分布に空間的な相関があると，光は相関に応じて干渉効果をもたらすからである．この種の規則性は多層膜やフォトニック結晶と異なり，乱雑さを基本としているので，全体としての反射率は小さく，また，方向性を持っていないことが特徴である．イトトンボの場合，同じ細胞中に黒いメラニン顆粒も存在し，温度が下がるとメラニン顆粒が細胞内に広く分布しはじめ，色を褐色に変えることが知られている．越冬するイトトンボが冬の間は褐色で，春になると水色に変色するのは，構造色をうまく取り入れた色変わりの仕組みだということになる．

このように，一見不規則な構造中に含まれる規則性の存在は，従来までチンダルブルーだと思われていた多くの構造に光の干渉の可能性を示すもので，今後の研究が楽しみである．

❖ 色素と構造

チョウの鱗粉には，メラニン系，オモクローム系，プテリン系，フラボノイド系，テトラピロール系，キノン系など，さまざまな色素の存在が報告されていて，赤や黄，青の着色に役立っている．しかし，これらの色素がきわめて薄い透かし彫り状態の鱗粉構造の中にどのように分布し，その複雑な構造とどのように相互作用しながら発色しているのかという研究は現在までほとんどない．単純に考えると，数 μm の厚みの鱗粉で特定の波長の光を吸収させようとすると，色素濃度は 10^{-2}mol/l 程度に濃縮する必要がある．通常の条件では，接近した色素間の相互作用のために，鮮やかな色を示す色素でもこげ茶色になってしまうだろう．

メラニン系の場合はタンパク質の構成成分であるチロシンなどが基となって作られるため，タンパク質と結合した形で色素は分布し，かなり高濃度の状態が実現されている．メラニン系の色素はほとんどの昆虫が有していて，可視域の広い範囲で光を吸収するため，茶色ないしはこげ茶色を表現するのに役立っている．構造色を示すタマムシ等は多層膜自体をメラニン色素で作っているため，多層膜干渉により黄緑色を作ると同時にメラニン色素の作用で，干渉に寄与しない赤色などを吸収することで，黄緑色の構造色のコントラストをあげている．

モルフォチョウでも，棚構造を持つ鱗粉の下部にメラニン色素を配置し，青色のコントラストをあげている．一方，モルフォチョウの仲間には，青色の翅の中に白色の斑点を見せるために，ミクロな構造はそのままにして単にメラニン色素を抜くだけで表現している種もある．メラニン色素がないと，干渉条件に合わない青の補色の光は棚構造を透過し，鱗粉下部や翅の膜・裏面の鱗粉などで散乱されるので，目には棚構造による青色と散乱に

よる補色が混ざり合い，結果として白色を表現している種も見られる．

シロチョウ科の仲間は鱗粉の下部に 200nm 程度の大きさの楕円体顆粒をたくさん持っているが，モンシロチョウではこれが効果的に光を散乱させ，白色を呈するのに役立っている（図 -5 右）．一方，キチョウではこの中に色素を入れることにより黄色の発色をしているとされている．しかし，わずか 200nm の大きさの楕円体で発色するためには，1 mol/l 程度の高濃度の色素が必要である．濃度を増すことなく吸収を効果的に起こすためには，何らかの方法で光路長を増す必要があり，そこに特別な光学現象の存在が示唆される．

一方，自然界には黒も多く使われている．アゲハチョウの仲間には真っ黒な翅を持った種類は多いが，翅に光を当ててもまったく「てからない」ので，我々が人工的に作った黒とは明らかに違うことがすぐ分かる．実測によれば，実に 95% 程度の光を吸収しているという報告がある．同じ翅を屈折率が整合する液体に入れ，吸収を測ってみると吸収の割合は 60% に減ることから，色素に加えて構造の果たす役割はきわめて大きいことが分かる．電子顕微鏡で調べてみると，この部分の鱗粉には，光をトラップするための楔形の構造があって，楔形構造の側面に光が当たると，次第に入射角を大きくしながら奥へ奥へと光は向かうことになる．側面に当たるたびに光は吸収されるので，ほぼ完全に吸収されるというわけである．このような仕組みはレーザートラップとして実際に応用されているが，ミクロンのスケールでこのような仕組みがあるのは驚きである．

このように自然界では，色素だけでは到底説明できないようなさまざまな機能を，色素と構造との密接な結びつきにより創出していると思われ，今後の研究が楽しみな分野である．

■色情報の利用

これら多種多様な色情報を昆虫たちはどのように利用しているのだろうか．これは最も面白い問題であるが，最も判断のつきにくい分野でもある．色情報の利用を考える場合には，とりあえず次の 2 点からの見方が必要であろう．1 つは昆虫同士の間での利用であり，もう 1 つは捕食者に対する利用である．つまり，同じ色情報を 2 通りに分けて考える必要があるということである．昆虫同士の間の色情報は，メスへのアピールであったり，ほかのオスへの縄張り誇示であったりするわけだが，そのとき情報を受け取る側は，ほぼ同じ行動様式を持ち，ほぼ同じ性能を持った視覚を持つ対象を考えればよい．それに対して，鳥などの捕食者に対する色情報としては，まったく異なる行動様式とはるかに高度な視覚を持つ対象を考える必要があるだろう．

捕食者である鳥に対する色情報の利用は，構造色の説明としてよく用いられている．たとえば，マダラチョウ科のサナギはまるで金属を思わせるような金色や銀色をしているが，これは光るものを嫌う鳥に対するメッセージであるとか，サナギの表面がまるで鏡のようになっているため周囲の景色を映し込んで隠ぺい効果があるからだと言われている．このような効果は，たしかに色素だけで実現しようとすると到底できない話で，クチクラと体液で作られる多数の多層膜の層間隔を少しずつ変化させることにより，可視域全域で反射率を高めた多層膜を作り上げた結果である．

マダラチョウ科やジャコウアゲハの仲間には毒を持つものが多いが，この種に似せた擬態は数多く報告されている．たとえば，ツマムラサキマダラのメスに似せたヤエヤマムラサキのオスは前翅端に独特の紫色の斑紋があるが，擬態するヤエヤマムラサキはこの部分の微細構造まで似せて作っているという報告がある．擬態には，ベニモンアゲハに似せたシロオビアゲハ，ハチに似せたスカシバガの仲間などのように有毒種に似せたベイツ型擬態，木の皮に似せたキシタバやキノカワガの仲間などの隠ぺいのための擬態のように，数多くのタイプとそれに属する種類が知られている．これらは，いずれも強力な捕食者である鳥の視覚や認知機能を利用した昆虫の戦略と考えてもよいだろう．

構造色が最もよく研究されたモルフォチョウについて，情報の受け手側の目を意識しながら，その構造色の特徴を見てみよう．モルフォチョウの翅の持つ特異な異方的な反射は，鳥に対する目くらましの効果があるとされている．たしかに，最も異方性の大きなレテノールモルフォ（図 -4 左）の場合，翅脈に沿った方向での反射光は角度にしてわずか 10 度ほどしか広がらない．したがって，仮にモルフォチョウが羽ばたく回数を 1 秒間に 2 回だとし，飛翔のときに真上から真下まで 180 度翅を動かすと，点灯時間はわずか 30 ミリ秒，つまり，テレビの 1 コマと同等の時間なのである．この短い間に反射率約 70% の青色の反射光を一気に目に集めることになり，フラッシュを浴びたような効果を相手に与えるのである．このような独特な異方性は明らかに鳥を意識したもののように思える．モルフォチョウは通常の飛翔ではかなり敏捷に飛ぶので，飛翔しているときに撮影したビデオでもその存在は光る点として見えるだけである．

一方，モルフォチョウのオスは，森の中で青い銀紙を吊るしておくと集まる性質があるのだが，これは銀紙をほかのオスだと思って自分の存在を誇示するため寄ってくるのだと言われている．このときの羽ばたき方は通常

の飛翔とまったく異なって，ひらひらと飛び，まるで青を誇示するかのようである．このように，モルフォチョウは反射特性の独特の異方性を用いて，捕食者である鳥やほかのオスに対して，時間というパラメータを使って，青い翅を使い分けているのではないかと思われる．

同じ構造色を示すタマムシなど甲虫の光る翅は，我々人間でも遠方から認識することができるが，光るものを嫌う鳥に対しては格好のサインになるであろうし，一方，止まっているメスにオスが近づくためにも十分な合図になるという両面を持っている．しかし，本当のところは何が真実なのかよく分からないというのが現状である．

以上，色情報の生成と利用というテーマで，色と微細構造の関係という側面から書いてみた．色を生成する微細構造は電子顕微鏡が手軽に使えるようになった今，簡単に調べることができるようになったが，得られた微細構造と実際に得られる色情報との間にはまだ大きなギャップがある．それは微細構造そのものの光学特性が複雑であるということもさることながら，その微細構造が置かれているさらに大きな構造の役割（たとえば鱗粉が翅に整列していることなど）が色情報という観点からはほとんど調べられておらず，さらに，それらが情報の受け手側でどのように認知されているかということは行動学的な手法を除いてほとんど手がつけられていない．その意味で，色情報の持つ意味を本当に知ろうとするならば，

1）微細構造と光との相互作用という物理的な観点，
2）微細構造がマクロな構造によってその光学特性にどのような変化を与えるかというマクロな視点，

それに，

3）情報の受け手側の視覚生理学的な視点，さらには，
4）それを認識するという認知脳科学的な側面など，多方面からの解析

が必要となってくるであろう．

参考文献

1）Kinoshita, S., Yoshioka, S., Fujii, Y. and Okamoto, N. : Photophysics of Structural Color in the Morpho Butterflies, FORMA 17, pp.103-121 (2002).
2）木下修一 : モルフォチョウの碧い輝き，化学同人，京都 (2005).
3）Kinoshita, S. and Yoshioka, S. (eds.) : Structural Colors in Biological Systems, Osaka University Press, Osaka (2005).
4）Kinoshita, S. : Structural Colors in the Realm of Nature, World Scientific Publishing, Singapore (2008).

（平成 20 年 11 月 14 日受付）

木下修一　skino@fbs.osaka-u.ac.jp

1977 年東京大学理学系大学院化学専門課程修了・理学博士．同年，大阪大学理学部物理学科助手，1989 年北海道大学電子科学研究所助教授，1995 年大阪大学理学部物理学科教授を経て，2002 年から同大学院生命機能研究科教授．