

自然界には鮮やかな色を持つ生物が多数存在する。中南米の青いモルフォチョウを始めとして、国内にもタマムシやコガネムシなど、金属のような輝きを持つ昆虫が生息している。構造色と呼ばれるこれらの色は、昆虫に限らず、鳥類、魚類、爬虫類など、動物界では広く用いられている着色方法で、あまり多くはないが植物の構造色も知られている。構造色は、色素分子による光吸収とは異なり、光の波長よりも小さな微細構造が、干渉や回折、散乱などの光学現象を起こして着色する。一般的な特徴としては、高い反射率による輝き、色の鮮やかさ（高い彩度）、角度による色変化、などを挙げることができる。さらに、液浸による色変化、偏光による色の变化、濡れているようなツヤ、など独特の様相を呈する構造色もあり、現在でも対象を拡大しながら活発な研究が続けられている。

“輝きのある色”を物理の言葉で表現すれば、波長選択性と高い反射率と言い換えることができるだろう。そのような特性を持つ光学現象として、厚さ 100nm 程度の薄膜が周期的に積層した構造が示す多層膜干渉が良く知られている。実際、屈折率が異なる二種類の酸化物を用いた誘電体多層膜は、ある波長帯域でほとんど 100%の反射率を持つため、レーザー反射鏡や光学フィルターなどに幅広く応用されている。自然界でも多層膜構造を利用する生物が多数知られており、タマムシがその代表例である。金属のような緑色の鞘翅の断面を透過型電子顕微鏡で観察すると、電子密度が異なる層が 20 層程度積み重なった様子をはっきりと観察できる。他にも、多くのチョウやガの仲間が多層膜構造を利用しているが、ここでは多層膜に簡単な工夫を加えることで、多彩な光学効果を実現しているニシキオオツバメガの構造色を紹介したい。

マダガスカルに生息するこのガは、黒い背景と極彩色のストライプで形成された際立った色模様を持っている（図 1）。モルフォチョウが背側にだけ青色を持っている（翅を閉じた腹側は茶色）のに対して、このガは両側に構造色を持っているのが特徴である。一般に、蝶や蛾の翅は鱗粉と呼ばれる小さな板状の粉で覆われている。その鱗粉には二種類が存在し、上下に重なった二層を形成するように配列するので、上側と下側の鱗粉はそれぞれ上層鱗、下層鱗と呼ばれている。ニシキオオツバメガの場合、構造色を持つのは上層鱗で、下層鱗はメラニン色素によると思われる黒い色を持っている。ただし、翅の黒い部分ではどちらの鱗粉も黒色である。

上層鱗の大きさはおよそ幅 100 μm 、長さ 250 μm 、厚さは 3 μm 程度であるが、図 2(a)の模式図に示すように鱗粉が縦方向に強く湾曲している。鱗粉の根元付近はおよそ平らであるが、先端に近づくにつれてせり上がり、その後曲率を変えながら半円を描くようにして先端まで下がっていく。また先端部分は隣の鱗粉の根元部分に重なっている。一方、鱗粉断面の狭い領域を透過型電子顕微鏡で観察すると、図 3 に示すようにクチクラ



図 1 ニシキオオツバメガ背側

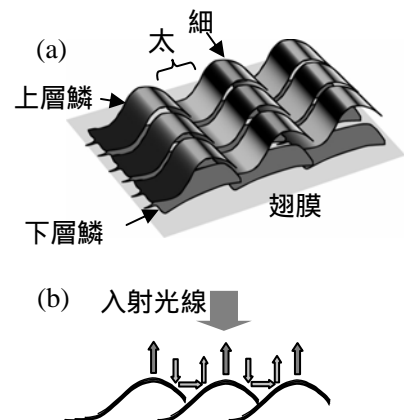


図 2 鱗粉構造の模式図(a) 反射モデル(b)

(翅を形成する材質)と空気が交互に重なった多層膜構造が確認できる。この構造は鱗粉の縦断面のどこでも観察できるが、クチクラの層数は、場所によって変化する。先端付近では最も多い6-7層が重なっているのに対して、根元付近では1-2層しかない。ただし、根元の部分は隣の鱗粉が上に重なるので、層の数を増やして反射率を高める必要がないのかもしれない。層の厚さは完全に一様ではないが、平均としてクチクラ層は170 nm、空気層は130 nmの厚みを持ち(後翅腹側の赤紫色の部分)、光の干渉を起こすのには適した厚さである。

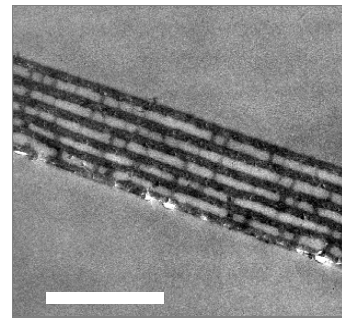


図3 鱗粉断面の透過型電子顕微鏡写真。白線：2μm

図4aは顕微鏡下で観察した鱗粉配列であるが、二本明るい帯(細い帯と太い帯)が鱗粉を横断している様相が見える。詳しく観察すると、図2aに示したように、細い帯は湾曲した鱗粉の頂点付近に位置し、一方太い帯は隣り合う鱗粉の間の谷の部分に見える。しかも、二本の帯の色は異なり太い帯の明るさは偏光に強く依存する。一方、近縁種であるナンベイツバメガの鱗粉配列写真を図4bに示すが、ニシキオオツバメガで見たような二本の帯は見られない。このガの鱗粉には、多層膜構造は存在するが、湾曲は小さいことが分っている。

湾曲した多層膜を持つ鱗粉の構造を考えると、図2bに示す、二つの反射経路の存在が予想できる。鱗粉の頂上付近の平らな部分は直接光を反射して細い帯を形成し、一方傾いた部分に入射した光は一度横方向に反射された後、隣の鱗粉によって上方向に反射される。この反射光が太い帯を形成する。二本の帯の色の違いは、多層膜構造に入射する角度が異なるため、干渉条件によって定量的に説明することができる。また、偏光依存に関しては一般的な境界面での反射特性から理解できる。通常S波、P波と区別される二つの偏光方向のうち、P波の反射率はS波よりも小さい。その反射が二重に起きるため、太い帯では異なる偏光の間で強度差が大きくなる。一方、湾曲が小さいナンベイツバメガでは、このような二つの反射経路は起こりえない。

肉眼でニシキオオツバメガの翅を観察すると、250μm程度に接近した二本の帯を分離して見ることは難しい。すなわち翅の色は、二色の色が混合されて見えることになる。色混合と呼ばれるこのような効果は、印象派の絵画技法やカラーテレビの原理に広く応用されている。ただし、このガの反射特性は強い偏光依存性を持つため、仮に太陽光のような無偏光な光で照らしたとしても、例えば昆虫一般の視覚のように、観察する側に偏光依存性があるだけで色が変化する特徴をもつ。

ニシキオオツバメガの構造色は、多層膜構造に湾曲という単純な工夫を加えることで、色混合や偏光特性などの光学効果を持たせていることが分かった。この他にも、最近の構造色研究は、様々な昆虫や鳥の羽根において、微細構造とその光学特性を明らかにしている。無数に分岐した自然界の生物種のことを思うと、これからも次々と巧妙な発色の工夫が明らかになっていくのではないだろうか。

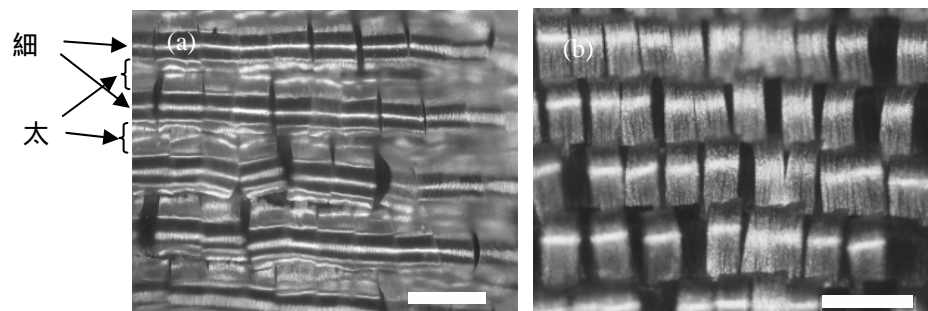


図4 鱗粉構造の顕微鏡写真 (a)ニシキオオツバメガ、(b)ナンベイツバメガ “細”と“太”で示した反射の帯は、図2bと対応している。白線：200μm