

モルフォ発色基板の試作

大阪大学理学研究科 吉岡伸也、木下修一

中南米に生息するモルフォ蝶の仲間は、強く輝く青色の翅を持っている(図1、図2)。そのキラキラとした青さには、一体どんな秘密があるのだろうか?そんな素朴な疑問から出発して、これまで我々は、電子顕微鏡観察、光学測定、モデル計算などを行い、発色の仕組みを調べてきた。その結果、鱗粉の一枚一枚が、規則な構造と不規則な構造の両方を併せ持つことが重要であることが分かってきた。走査型電子顕微鏡写真(図3)から、ディディウスモルフォ(*M.didius*)の下層鱗には、7段ほどの柵を持つマイクロな構造体がぎっしりと林立していることがわかる。上下の柵の間隔を調べると、往復の光学距離が青色の光の波長に対応している。したがって、それぞれの柵からの反射光が多層膜干渉のように強め合い、青色を強く反射することがわかる。(構造の規則性)一方、左右に隣り合う柵の高さを調べると、柵ひとつ分の高さほどのばらつきがみられる。この高さ方向の乱雑性(不規則性)は、隣り合う柵構造から反射された光が、実質的には干渉しなくなることを意味し、それぞれの柵構造からの反射光は、広い範囲の角度に渡って回折広がりを起こすことになる。これが、モルフォ蝶の翅がおよそどの角度から見ても青色であることを説明する。また、鱗粉表面の構造だけでなく、色素の存在も翅の色に重要な役割を果たしていることが分かってきた。図2のスルコフスキーモルフォ(*M.sulkowskyi*)の鱗粉は、図3で示したディディウスモルフォの下層鱗の構造とそっくりな微細構造を持っている。しかし、図1と図2の比較で分かるように、両者の色合いには大きな違いが見られる。ディディウス



図1 ディディウスモルフォ (*M.didius*)



図2 スルコフスキーモルフォ (*M.sulkowskyi*)

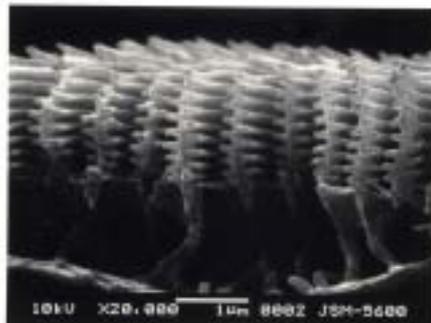


図3 ディディウスモルフォの下層鱗の断面の走査電子顕微鏡写真。

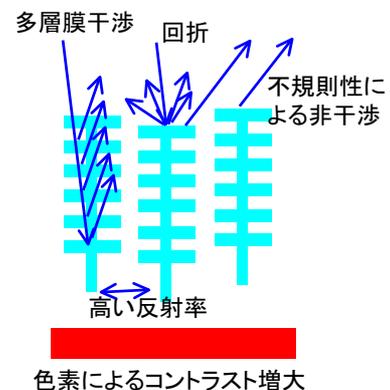


図4 モルフォ蝶の発色の仕組み

スモルフォがコバルトブルーの濃い青色を持っているのに対して、スルコフスキーモルフォは真珠のように白っぽく青い。この違いは、現在、鱗粉に含まれるの色素の量に起因すると解釈されている。すなわち、色素の多いディディウスモルフォは、後側からの透過光や乱反射した白色の光を吸収するために、青さのコントラストが増すのであると。

このようにして、モルフォ蝶の発色の仕組みには、構造の規則性と不規則性、そして色素の三つの要素が効いていると考えられている（図 4）。本研究では、これらの要素をもった基板を人工的に作り出し、モルフォ蝶の青色を再現することを試みた。その目的は、現在考えている発色の仕組みが本当に正しいものなのかを確認することであるが、“もしも緑色のモルフォ蝶を作れたら面白いだろうか”という興味や、視覚的な効果を得らった応用製品への可能性を探る意味も含んでいる。

再現基板の製作には図 5 に示すような方法を用いた。

1. ガラス基板を用意し、荒い研磨剤を用いて表面に凸凹をつくる。（構造の不規則性）
ガラス基板には、複数の ND フィルターを用い、透過率の差で色素の量を調節する。
2. 凸凹のある基板表面上に誘電体多層膜を周期的に蒸着し、青色の光を選択的に反射させる（構造の規則性）。

実際に用いたガラス基板は、平面ガラス基板（BK7）、透過率がそれぞれ、1、5、10、25、50、70%の ND フィルターである。研磨剤には#500（粒径がおよそ 20um）を用いた。誘電体多層膜構造の設計は、平面基盤に蒸着した場合に反射率のピークが 90% @480nm となるような構造を用いた。

図 6 と図 7 に透過率が 5% と 70% の ND フィルターを用いた再現基板と、モルフォ蝶との比較写真を示す。図 6 には比較のために、凸凹を持たないフラットな基板に多層膜蒸着をおこなった基板も写してある。フラットな基板の場合、光は直接反射される角度以外の方向には反射されないのので、角度をつけて見た場合には黒く写っている。このことは、幅広い方向に光を反射するためには構造の不規則性が必要であることを示している。また、角度による基板の色の変化は、モルフォ蝶の変化をおよそ再現していることが分かる。それらを、定量的に表現するため、反射スペクトルの角度依存性の測定した（図 8）。スペクトルの角度変化は定性的には良く一致しており、見た色の類似性をスペクトルの上でも確認できた。

また、図 6 と図 7 の比較から分かるように、ディディウスモルフォとスルコフスキーモルフォの差は、ND フィルターの透過率の差として表現されている。ただし、これは基板を白い紙の上に置いているので、背面からの反射光の

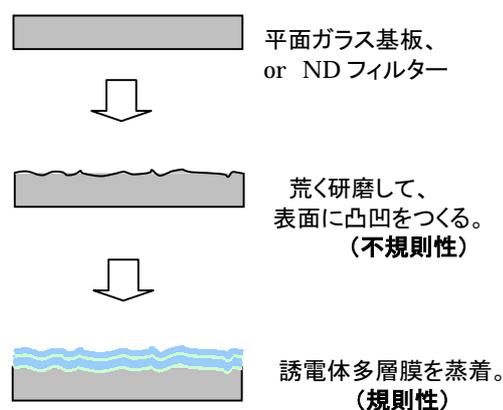


図 5 再現基板の製作過程

寄与も含んでいる。(もし、黒い紙の上に二つの再現基板を置くと、そもそも透過光が存在しないために両者は同じように見える。) 実際のスルコフスキーの翅の場合には、黒い紙の上に置いてそれほど色は変わって見えない。これは、翅に含まれる色素の量が少ないだけでなく、翅自体に積極的に白く色を反射するはらたきがあるためであり、その点は再現はされていない。

今回試作した再現基板は、色の角度変化という点は、モルフォ蝶を良く再現できた。また、二つの種類のモルフォ蝶の色の差は、色素の濃度を調節することで似せることができた。その意味において、構造の規則性、不規則性、色素という三つの要素が、発色機構にとって重要であることが、今回の再現実験を通じても明らかになったと言える。しかし、再現基板には、モルフォ蝶に見られるような滑らかなツヤ、あるいはキラキラとした輝きがみられない。特に、図7においてその差は顕著である。“滑らかなツヤ”を物理的にどう表現するかはまだはっきりとしないが、その原因の一つの候補は、モルフォ蝶の鱗粉の持つ異方的な反射特性である。すなわち、鱗粉が表面上の筋に垂直な方向にのみ青色を強く反射するのに対して、再現基板にはそのような異方性がなく、全方向に拡散光を生み出している。現在、その点を考慮した異方性を持つ再現基板を製作中である。

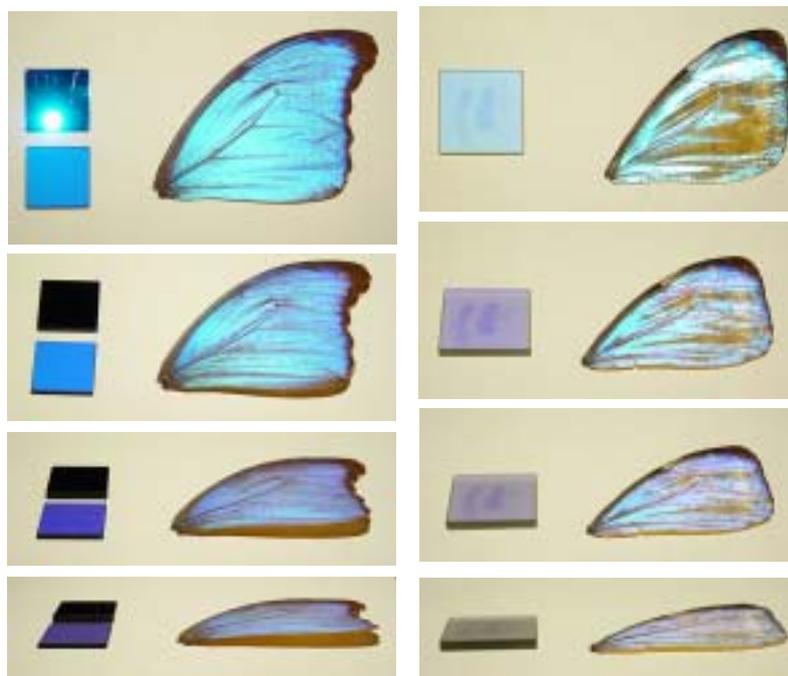


図6 ラフネス無(左上)と有(左下)の再現基板(透過率5%のND)、ディディウスモルフォ(右)の角度による色の変化。(照明は垂直に入射)

図7 再現基板(左側、透過率70%のND)とスルコフスキーモルフォ(右)の角度による色の変化。(照明は垂直に入射)

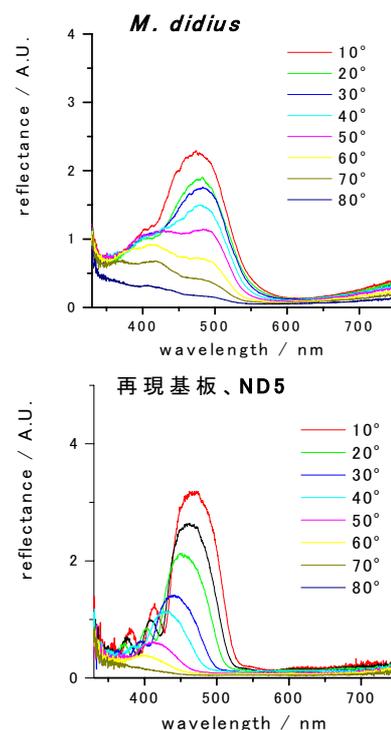


図8 ディディウスモルフォ(上)と再現基板(下)の反射スペクトルの角度依存性。垂直入射の場合。