



## 生物の色彩光学

### —蝶翅鱗粉の構造的発色と光学特性—

田畑 洋\*・田中 信吾\*・滝本 淳一\*・秋本眞喜雄\*\*  
並木 秀男\*\*・吉田 昭広\*\*\*

\* 日産自動車(株)総合研究所基礎研究所 〒237 横須賀市夏島町 1

\*\* 早稲田大学教育学部生物学教室 〒169 東京都新宿区西早稲田 1-6-1

\*\*\* 日本たばこ産業(株)生命誌研究館設立準備室 〒105 東京都港区虎ノ門 2-3-13

(1992年9月30日受付, 1993年7月22日受理)

## Colored Optics in Living Things

### —Structural Coloration and Optical Properties of Butterfly Wings—

Hiroshi TABATA,\* Shingo TANAKA,\* Jun-ichi TAKIMOTO,\* Makio AKIMOTO,\*\*  
Hideo NAMIKI\*\* and Akihiro YOSHIDA\*\*\*

\* Scientific Research Laboratory, Nissan Research Center, Nissan  
Motor Co., Ltd., 1, Natsushima-cho, Yokosuka 237

\*\* Department of Biology, School of Education, Waseda University,  
1-6-1, Nishi-Waseda, Shinjuku-ku, Tokyo 169

\*\*\* Biohistory Research Hall, Japan Tabaco Inc., 2-3-13, Toranomon,  
Minato-ku, Tokyo 105

(Received September 30, 1992; Accepted July 22, 1993)

Structure and optical properties of wings of *Morpho* butterflies are studied, aiming at clarifying the basic characteristics of structurally colored materials which are studied by Biologists (ex. H. Ghiradella, *et al.* 1972, 1985). Scanning electron micrographs (SEM) of the wing scales show that the scales have complicated lamellae structure, and light interference due to this structure is the origin of brilliant blue color of the wings. Reflection spectra of these wings are measured at various incident and observing angles; they are characterized by (i) strong anisotropy and (ii) to be felt brightly rather than values of lightness for samples. Standard color evaluation/specification systems for ordinary color (i. e., color due to light absorption by material) seem to be insufficient for this kind of structural color, and new systems are necessary as a basis for developing and utilizing structurally colored materials.

### 1. はじめに

最近, 高級感塗膜や化粧品パッケージなどに見られるように観察方向によって色調が変化するという異方性反射特性(アニソトロピック特性)を持つ光学機能材料が注目され, それらの光学的特性の研究が盛んになりつつある<sup>1)</sup>.

このような光学的特性を持つ材料は上述のような材料だけでなく, 自然界の中にも数多く見ることができる。

たとえば自然光をたくみに利用する動物の体表面の鮮やかな色彩や模様はその代表的な例である。動物学の分野ではこのような体表面の色彩や色彩変化を体色や体色変化と総称し, 特に動物行動学的な意味や生命維持活動などにおいて重要な機能の一つであることが知られている。

一般に動植物の色彩は色素に由来することが多い。しかし, 熱帯性魚類や両生類などは一般的な色素とはまったく異なる虹色素胞<sup>2)</sup>と呼ぶ特殊な細胞内の生理的作用

機構により、ダイナミックにあるいは意図的に体色を変化させている。また孔雀の羽毛やある種の昆虫の翅で見られるように、体表面に形成された極めて微細で、比較的規則性の高い幾何学的形態に起因して発色する例も知られている。これらの発色現象については、前者の場合を運動性、後者の場合を非運動性の構造的発色と呼ぶことができる。

また、一般的に生物の場合、青や緑の色素が存在しないにもかかわらず、これらの波長領域の鮮やかな発色や場合によっては極めて高い金属光沢を感じさせることもある。このように自然界にも興味深い光学的特性を持つ材料が多々存在するが、材料の形態学的かつ色彩光学的な研究は極めて少ないのが現状である。

本研究は、このような背景の中で、主に材料固有の微細構造に起因する非運動性の構造的発色について、材料にモルフォ蝶を取り上げ、その鱗粉の微細な構造形態に基づく光学的特性の評価を試みた<sup>3,4)</sup>。

なお一部のモルフォ蝶の発色については、蝶の発色分類の観点から、Süfert<sup>5)</sup>により光干渉型と記載されたのが最初の報告と思われる。その後、Ghiradella<sup>6,7)</sup>が干渉、回折、散乱など一般的な物理現象を基に総合的に蝶の構造的発色を分類した論文を報告している。一方、国内においては、江崎<sup>8)</sup>および牟田<sup>9)</sup>の報告が見られるのみである。また1968年には多層膜構造の幾何光学的な解析方法に関する論文がHuxley<sup>10)</sup>により報告された。しかし、これら多くの報告は昆虫分類学に主眼があるため、素材界面の形態やその光学的特性、さらに色彩学的視点を加味した研究はほとんど報告されていない。そこで、本研究の目的とする微細構造とその光学的特性の検討は新しい測光測色技術の必要性など色彩光学関連技術だけでなく、材料工学さらには感性工学など工学分野の拡大といった観点からも有意義と考える。

## 2. 材料と実験方法

### 2.1 材 料

本研究に用いた材料は、南米産のモルフォチョウ属 (*Morphidae*) の発色特性が多少異なるディディウスモルフォ (*Morphodidius*) とスルコススキーモルフォ (*Morpho sulkowskyi*) である。Fig. 1 にその翅の光学顕微鏡写真を示す。

蝶翅の表面形態は、basal scale および cover scale と呼ばれる2種類の鱗粉(約  $100\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ /枚) が翅上のソケットと呼ばれる部分に1枚1枚嵌め込まれ、規則正しく配列している構造が一般的である。ディディウス

モルフォの場合は、この2種類の鱗粉がある一定の比率で重なり合うといった鱗粉目(昆虫分類法)の基本的な配列パターンを示している。また cover scale はかなり透明に近いが、basal scale は不透明である。これに対してスルコススキーモルフォの場合は、幅の細い cover scale と幅の広い basal scale とが交互に配列したパターンで、両者とも透明に近い。

Fig. 2 に両試料の鱗粉断面の走査型電子顕微鏡写真(断面方向は Fig. 1 中に示す)を示す。両試料とも鱗粉の付け根部から先端部に向かって ridge と呼ばれる細い屏風状の突起が平行に走り、この ridge に lamella と呼ばれる複数の凸状突起がサブミクロンからミクロンオーダーの間隔で複数形成されている。

ディディウスモルフォの場合、cover scale と basal scale において ridge 間隔や lamellae 枚数が異なっている。また ridge の下部を trabeculae と呼ぶが、cover scale はそれがほとんど目立たない程度である。一方、スルコススキーモルフォの場合、2種類の鱗粉の微細構造形態はほぼ同様の構造を持っている。

Fig. 3 はディディウスモルフォの basal scale およびスルコススキーモルフォの cover と basal scale の模式図を示したものである。Ridge の繰り返し方向を x 軸、

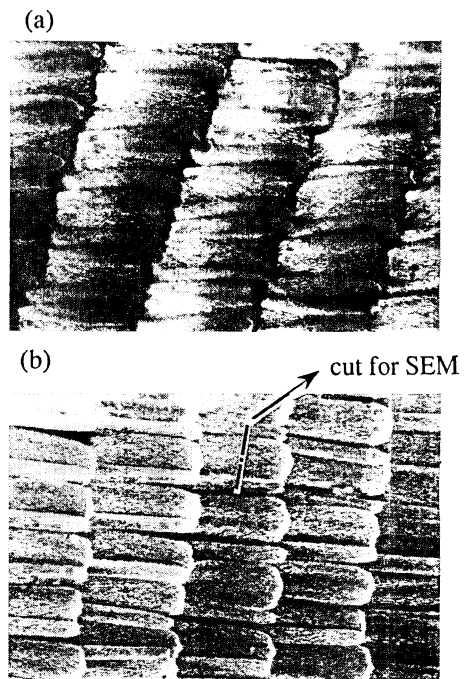
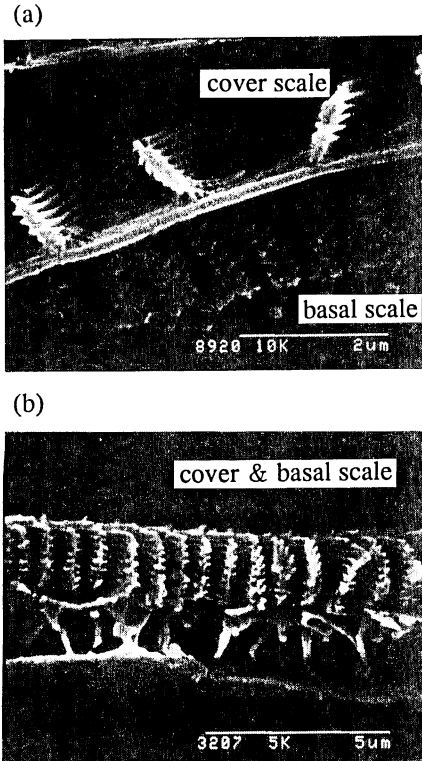
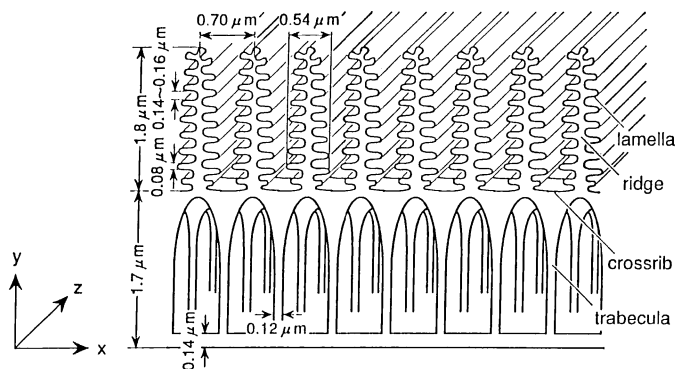


Fig. 1 Optical micrographs of parts of wings. ( $\times 200$ ) (a) *Morpho didius*, (b) *Morpho sulkowskyi*.



**Fig. 2** SEM views of transverse sections of scales. (a) *Morpho didius*; The microstructure of the cover and basal scales are a little different. (b) *Morpho sulkovskyi*; The microstructure of the cover and basal scales are much the same.

奥行き方向を  $y$  軸, ridge の基部から上方向を  $z$  軸とするように座標軸をとると, 鱗粉形態の特徴は次のように要約できる。(a)  $x$  軸方向には周期的な繰返し性, (b)  $y$  軸方向には一様, (c)  $z$  軸方向には層構造の表面特性を持った材料と言える



**Fig. 3** Diagrammatic representation of a portion of a scale. (corresponding to basal scales of *Morpho didius*, cover and basal scales of *Morpho sulkovskyi*)

## 2.2 光学特性の測定

一般に構造的発色材料は, アニソトロピック特性を持つことが多いため, 入射光に対し, 反射ピークがその正反射方向や入射面内に存在するとは限らず, 非常に複雑な光学特性を持つことが予想される. 日常このような特性を持つ材料を目にしているにもかかわらず, これらの材料に対する最適測定系や光学特性, さらに色彩感覚などに関する研究は遅れているのが現状である. このような状況のため, 本研究における測光系は入射面と同一面内での測定に限って実施した. 具体的な測定方法を以下に述べる.

まず最初にモルフォチョウの基本的な発色現象を検討するため, 顕微分光光度計 (日立製作所製 U 6000) による  $0^\circ-0^\circ$  測光系および分光式色差計 (日本電色工業社製, SZ-Σ 80 型) を用い,  $0^\circ-45^\circ$  測光系における分光反射率の測定を行った. 次に観測方向による分光スペクトルの変化を得るため, **Fig. 4** に示すように, 蝶翅上の鱗粉の基部 (ソケット部) から先端方向への方位を  $0^\circ$  とし, 試料を時計方向に回転しながら測定した. また同一面内での角度依存性を比較するため, 三次元分光式変角色彩計 (日本電色工業社製, GC-Σ 90 型) を用い, 入射角を  $-45^\circ$  (蝶翅上の鱗粉基部側) 一定とし, 受光角を  $-70^\circ \sim 70^\circ$  の範囲で変化させた時の反射率を測定した.

なお反射率については標準白色板に対する比較反射率で示す. 測定試料については, 鱗粉が翅に対し,  $15^\circ$  前後の傾きを持って保持されているため, 試料上にカバーガラスを置き, 一定圧で押さえることにより, 測定時の試料条件を統一した. また分光スペクトルからの色彩情報の表示には,  $D_{65}$  標準光および  $2^\circ$  視野における CIE 等色関数を用いて色度座標等の計算を行った.

3. 実験結果と考察

3.1 材料の形態特性と光学特性

Fig. 5 にディディウスモルフォとスルコフスキーモ

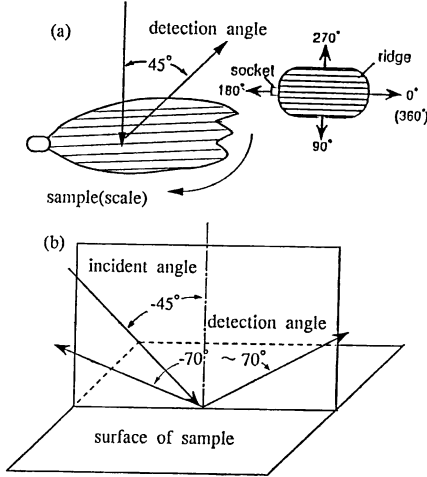


Fig. 4 Photometric method of scales. (a) Photometric system of 0°-45°, (b) Photometric system of -45°, -70°-70°.

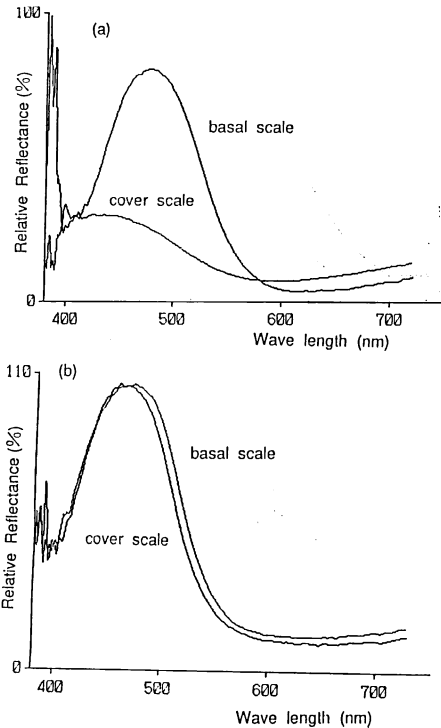


Fig. 5 Measured results of the reflection spectra. The angles of both incidence and detection are 0°. (a) *Morpho didius*, (b) *Morpho sulkowskyi*.

ルフォの 0°-0° 測光系での分光反射スペクトルを示す。

ディディウスモルフォの cover scale は Fig. 2 の SEM 写真に見られるように ridge 間隔が広く, lamellae 枚数も少ないため, 比較的低い分光反射率となっている。

一方, ディディウスモルフォの basal scale およびスルコフスキーモルフォの cover と basal scale は ridge 間隔が狭く, lamellae 枚数も多い類似の形態から, それらの分光スペクトルも類似し, 480 nm 付近に反射率のピークが見られる。

Fig. 6 に 0°-45° 測光系における両試料の観測方向の違いによる分光スペクトルの変化を示す。

両試料とも ridge ラインに対し, 直角方向から ±30° 付近に大きな反射率を示し, ridge ラインに平行になるにしたがって反射率が低くなるといった周期的な特性が見られ, 高反射率を示す波長領域は 430~480 nm 付近に見られる。

またスルコフスキーモルフォの場合は, ridge ライン方向 (試料の回転角 0°) 付近では, 短波長側での反射率は極めて低く, 540 nm 付近から長波長側にかけて反射

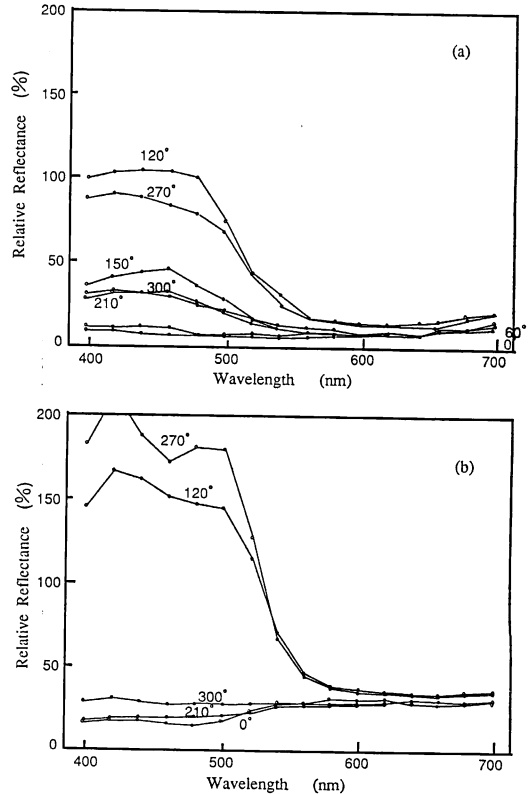


Fig. 6 Measured results of the reflection spectra of scales depending upon the rotation of samples. Photometric system is 0°-45°. (a) *Morpho didius*, (b) *Morpho sulkowskyi*.

率のなだらかな増加傾向が見られる。

さらに試料の回転角  $0^\circ$  の条件におけるディディウスモルフォとスルコフスキーモルフォの  $L^*a^*b^*$  の値は、それぞれ [26.8, 11.8, -6.7], [58.3, 0.3, 21.6] となり、後者試料は前者試料に比べ明度が高く、また黄色系の発色領域も存在することがわかる。

このような観測角による分光反射特性の違いによる色変化を把握するため、Fig. 7 に両試料の色度座標を示した。また Fig. 8 は各観測角での試料そのものおよび試料を用いた主観評価結果をグレースケールにおけるY値と比較し、明るさに対する感じ方を調べたものである。

ディディウスモルフォの発色は、主波長  $\lambda_d=460\sim 480$

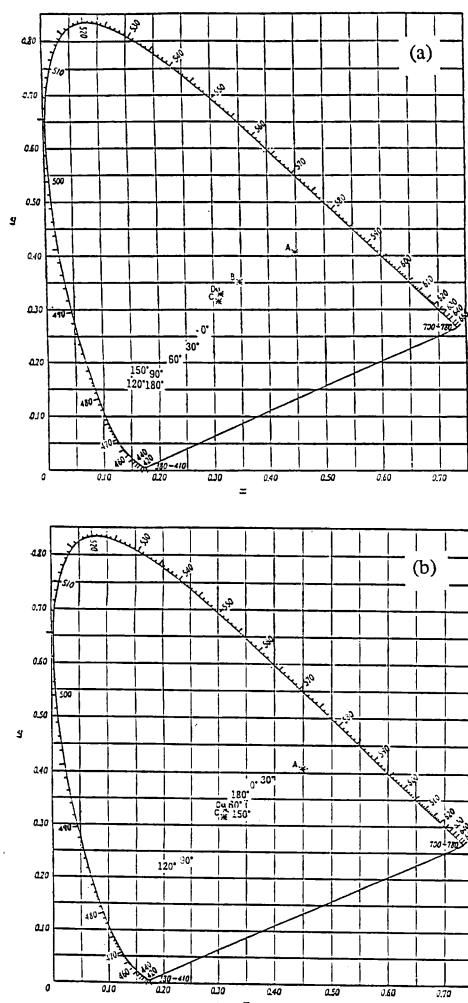


Fig. 7 Color specification with the chromaticity coordinates. (a) *Morpho didius*; The dominant wavelength,  $\lambda_d=475\sim 480$  nm. (b) *Morpho sulkowski*; The dominant wavelength,  $\lambda_d=469$  nm, 576 nm.

nm の青色領域に存在し、試料の回転角により、主に刺激純度が変化する特徴を示す。またスルコフスキーモルフォの発色域は  $D_{65}$  の白色点を挟んで主波長  $\lambda_d=470\sim 480$  nm の青色領域と反対色の主波長  $\lambda_d=570\sim 600$  nm の黄色領域の二方向にあることがわかる。また明るさ知覚における色みの寄与において矢口、池田および中野などは彩度の高い波長域ほど比視感度が高く明るく見ると言っており<sup>11,12)</sup>、本試料の主波長域からみても主観評価値の方が高くなることは十分うなずける結果と言える。

Fig. 2, 3 で示した両試料の構造の類似性および蝶翅の基本構成材料(クチクラ)の同一性からすれば、色度座標における彩度の違い(ディディウスモルフォがスルコフスキーモルフォより多少高い傾向)やY値レベルの違い、さらにスルコフスキーモルフォのように ridge に平行に近い反射光での黄色系の存在等の違いの要因は理解しにくい。これらの要因について材料および構造的な面から考察を加えてみる。

顕微分光光度計を用いた鱗粉の透明度観察によると、ディディウスモルフォはスルコフスキーモルフォに比べ

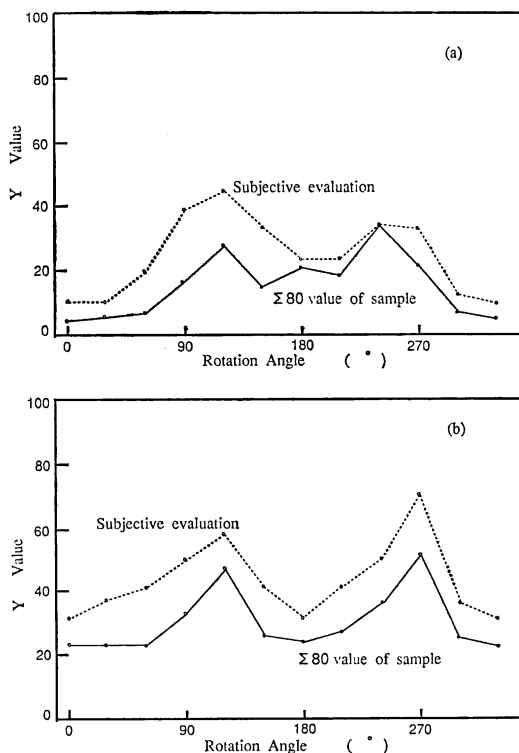


Fig. 8 Comparison subjective evaluation and measurement value's sample of Y values on Gray scale. (a) *Morpho didius*, (b) *Morpho sulkowski*.

非常に透明度が低い。このことはおそらく前者の scale の底部構造 (trabeculae) 内に黒色メラニン色素 (eumelanin) の存在が考えられ、この色素が lamellae 構造内透過光の吸収作用により、構造内拡散光に基づく迷光が極めて少なくなるため、彩度が高くなる傾向を示すものと考えられる。

一方スルコフスキーモルフォの場合、黒色メラニン色素が存在しないことにより、lamellae 底部からの反射や散乱等による構造内部での拡散反射光が比較的多くなるため、ディディウスモルフォに比べ彩度が多少低くなるものと考えられる。また黄色系のスペクトル発現については、構成材料のクチクラの性質に由来するものと思われる。さらにディディウスモルフォに比べ高い Y 値を示す原因は、Fig. 5 からわかるように cover scale および basal scale ともに同等強度の分光反射スペクトルを持っていることに関係するものと考えられる。

Fig. 9 にスルコフスキーモルフォの場合の入射角  $-45^\circ$  における入射面内での受光角依存性の測定例を示す。

入射光が ridge と平行 (試料設置角  $0^\circ$ ) の場合には、 $30^\circ$  付近に非常に強い反射ピークが存在し、 $20^\circ \sim 40^\circ$  の正反射方向に強い反射スペクトルが得られ、再帰性反射特性は全く見られない。しかし、入射光が ridge と直角 (試料設置角  $90^\circ$ ) の場合には、正反射方向への反射強度は弱くなり、 $-5^\circ \sim 10^\circ$  に強い反射ピークが存在する。さらに  $-40^\circ \sim 25^\circ$  の広い角度範囲に強い反度スペクトルを示す再帰性反射特性が見られるなど非常に特徴的な反射特性を示す。

### 3.2 光学モデル検討

鱗粉構造の三つの特徴については前述したが、光学的性質においてもっとも重要な機能は  $x$  方向に lamella と空気層が交互に重層している層構造の存在であると予想される。この予想を確かめるために、Fig. 10 のような単純な多層薄膜モデルを用い、鱗粉の反射スペクトルがどの程度再現可能かを検討した。

このような多層薄膜による干渉の結果得られる反射スペクトルについては、既によく知られた結果がある。例えば層の枚数  $N$  が大きい場合、垂直入射における反射スペクトルは次式で与えられる波長を中心に強い反射バンドを持つ。

$$\lambda_0 = 2(n_a d_a + n_b d_b) \quad (1)$$

ここで  $d_a, d_b$  はそれぞれ空気層と物質層 (lamella) の厚さ、 $n_a, n_b$  はそれぞれの屈折率、 $\lambda$  は測定波長である。空気の屈折率  $n_a = 1.0$  とする。さらに空気層と物質層

(lamella) との光学的厚みが等しい場合 ( $n_a d_a = n_b d_b$ ) には、反射バンドのバンド幅  $\Delta\lambda$  と中心波長  $\lambda_0$  との比は次式で近似できる。

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{4}{\pi} \sin^{-1} \frac{n_b - n_a}{n_b + n_a} \quad (2)$$

そこで Fig. 5 の反射スペクトルの実測値から  $\lambda_0 \sim 480$

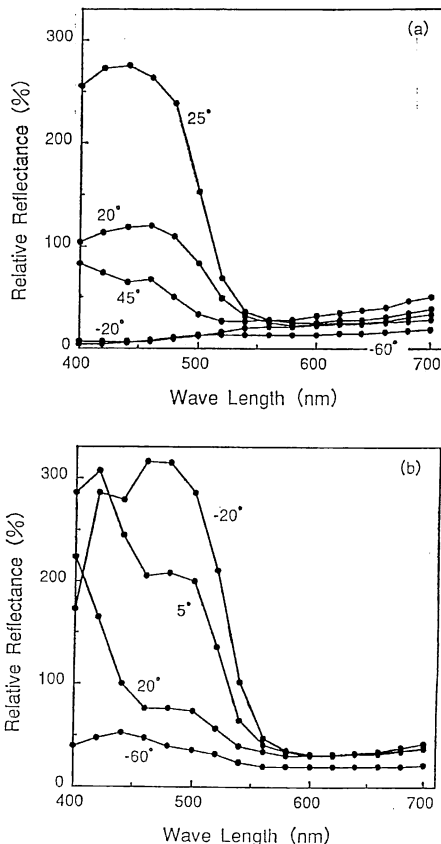


Fig. 9 Measured results of the reflection spectra of scales of *Morpho sulcowskyi* depending upon the angles of detection. (a) with incidence parallel to ridges, (b) with incidence vertical to ridges.

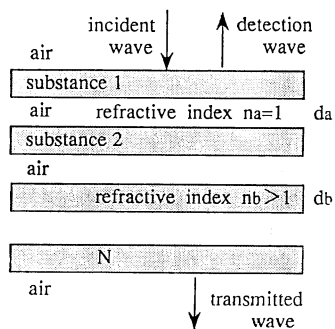


Fig. 10 A multi-layered thin films model.

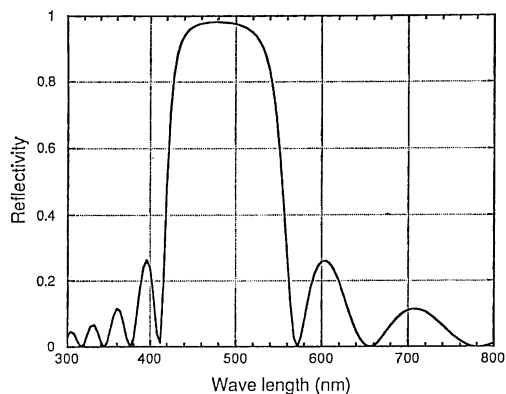


Fig. 11 Calculated reflection spectra from the model. Parameter; number of lamellae=8,  $d_a=120$  nm,  $d_b=85$  nm,  $n_a=1.0$ ,  $n_b=1.4$ .

nm,  $\Delta\lambda\sim 110$  nm と見積られるので,  $n_a d_a = n_b d_b$  の関係が近似的に成立していると仮定すれば, 式(1), (2)を用いて  $d_a\sim 120$  nm,  $d_b\sim 85$  nm,  $n_b\sim 1.4$  と求めることができる. この  $d_a$ ,  $d_b$  の値は電子顕微鏡観察から得られた scale の断面模式図による値とも十分近い. また lamellae を構成する材料(クチクラと総称される)の屈折率  $n_b$  の値については, キチクラが動物の表皮細胞(cuticle)蛋白質に近い性質であることを考慮すると 1.5 前後の値であり, 前記の見積りと矛盾しないことがわかる.

Fig. 11 はこのようにして決定したパラメータを用いて, 多層薄膜モデルに対し計算した反射スペクトルの一例である(lamellae 枚数は8枚とした).

ここで採用したモデルが実際の鱗粉構造に対し極端に単純化されていることを考慮すれば,  $0^\circ-0^\circ$  測光系, すなわち正反射成分のみとの対応であるが, 屈折率既知の各種基準溶媒を用いた屈折率測定法による結果( $n=1.5$ 程度)とも比較的近い値であると考えられる. これらのことから, 鱗粉の光学的特徴のもっとも基本的な部分の特性は, 多層薄膜による干渉現象で説明できることがわかる.

#### 4. ま と め

生物の中には, その構成材料固有の色からは想定しがたい色を持つものが多く存在する. しかし, このような特性を示す対象物について, 材料と色彩光学といった観点からの研究例は極めて少ない.

本研究では, そのような例としてモルフォチョウ翅を材料に用い, その表面構造とそれに伴う構造的発色特性

について検討した.

その結果, 本材料の発色機構については, 単純な光学モデルによる計算であるが, その主要因は薄膜干渉現象に基づいていることを明確にした. また, このような現象を示す材料の発色特性については, 材料組成が持つ本来の色とは異なる発色を示し, 材料の分光反射特性に依存する色とは異なる発色を示し, 材料そのものの明度測定値よりも主観的には明るく感じられる傾向にある. しかもこれらの特徴は, 観察角度の依存性も非常に大きいことが明らかになった.

このような構造的発色機構を持つ材料系の色彩表示については, 現在の CIE 表示系で概ね表現可能である. しかし, このような材料系の特徴的な光学機能である三次元的に広がる空間反射スペクトルを同時に測光可能な最適測定系がないのが現状である. したがって, このような測定系の開発および反射スペクトルの空間分布の評価をさらに進めることは光学分野の発展だけでなく, 新しい材料設計の基礎としても重要であろうと考えられる.

#### 文 献

- 1) アニソトロピックカラーの計測と塗膜質感講演会; 色材協会関東支部 (1992).
- 2) 上島孝久: “虹色素胞: 動物における構造的発色”, 細胞, **23** (1991) 501-506.
- 3) 秋本真喜雄, 並木秀男, 田中信吾, 田畑 洋, 吉田昭広: “モルフォ蝶鱗粉の構造的発色機構と色彩評価”, 日本動物学会第63回大会 (1992).
- 4) 秋本真喜雄, 菅原 均, 並木秀男, 田中信吾, 田畑 洋, 吉田昭広: “構造発色の光学特性と色彩評価”, 第39回応用物理学会, 28p-c-16 (1992).
- 5) Fritz Stüffert: “Morphologie und Optik. Der Schmetterlingsschuppen, Insbesondere die Schillerfarben der Schmetterlinge,” Z. Morphol. Oekol. Tiere, Bd. 1 (1924) 171-308.
- 6) H. Ghiradella: “Structure of iridescent lepidopteran scales; Variation on several themes,” Ann. Entomol. Soc. Am., **77** (1984) 637-645.
- 7) H. Ghiradella: “Structure and development of iridescent lepidopteran scales; The papilionidae as a showcase family,” Ann. Entomol. Soc. Am., **78** (1985) 252-264.
- 8) 江崎梯三: “蝶の斑紋”, 宝塚昆虫館報, 第9号 (1941) 1-4.
- 9) 幸田明徳: “電子顕微鏡による蝶の鱗片の研究”, 動物学雑誌, **58** (1948) 146-150.
- 10) A. F. Huxley: “A theoretical treatment of light by multilayer structures,” J. Exp. Biol., **48** (1968) 227-245.
- 11) 矢口博久, 池田光男: “明るさ評価のための測光システム”, 光学, **13** (1984) 140-145.
- 12) 中野靖久: “明るさ知覚モデルとその個人データへの適用”, 光学, **21** (1992) 705-712.