

生物にみる構造的な光制御

田畑 洋・熊沢 金也

現代の社会は感性社会といわれている。その結果のひとつとして、工学の領域においても、感性創造工学や快適性工学あるいは材料質感工学など、多種多様な学問の境界領域からなる新しい工学を志向しようとする動きが活発化してきている。色材としての視点からみても、従来の定義に基づく物体色や光源色などで表し難い、異方性反射特性（アニソトロピック特性）をもつ光学材料や、さらには可視光領域以外にも特性をもつ光学機能材料に興味をもたれつつある。

一方、生物界には、体表面の微細かつ特殊な構造形態によって光を巧みに制御し、種々の光学特性を発現している数多くの例が存在している。一般的に物体色の場合、入射光に対して、その構成材料固有の反射スペクトルに伴い発色するが、生物の場合は体色と呼ばれ、体表面層に存在する各種の色素に起因して発色する。また、一般的に動物の場合、青色色素を体内合成できないはずであるが、熱帯性魚類や両生類、爬虫類あるいは鳥類、昆虫類などに頻繁にみることができる。近年、これらは新しく構造的な発色（structural color）と呼ばれており、前者は外界からの刺激によってダイナミックに体色を変化させ、動物行動学等では警戒色や保護色などと呼ばれているが、特にこれらの場合には「運動性の構造的な発色」といわれている。後者は体表皮細胞の役割に伴って、その成長過程で分配・形成され、多種多様な規則性の高い微細な形態構造に基づいて発色するものであり、前者に対して「非運動性の構造的な発色」ということができよう。

これらの発色機構は光学物理的にも興味深い対象であるが、さらに、新機能的な材料やデバイス等の創成においても

非常に興味深いヒントを内在していると考えられる。しかし、前述したように、これらの発色現象に対しては、元来が生物分類学や行動学・細胞学等の問題意識が主であったため、材料工学的観点からの研究はまだ比較的少ないように思われる。そこで本稿ではいくつかの生物例を取り上げ、それらの光学的特徴について紹介する。

1. 構造的な発色

1.1 光学物理的発色分類と発現生物例

一般的に構造的な発色の基本的原理は表1に示すようにおおむね3つに分類でき、生物の体色でもこの範疇に入る例がいくつか報告されている。

1.1.1 チンダル散乱による発色現象

ある媒体の中に、その媒体の屈折率と異なり発色波長の約1/10以下の大きさの微粒子がコロイドとして分散しているときに生じる現象である。例えば、青空の場合は入射光の長波長成分は透過するが、短波長成分は屈折・反射されて青系のスペクトルがみられることになる。また、生物の例では色素胞（chromatophore）内の細胞質に対する顆粒の存在によって同様の現象が引き起こされている^{1,2)}。

1.1.2 回折による発色現象

CD等の表面のように微細で規則性の高い線条や凹凸によって、光が回折、分光されて生じる現象であり、表1に身近な代表例を示した。

1.1.3 薄膜干渉による発色現象

水面に広がる油膜やニュートンリングなどと基本的には同じ原理によるものであり、生物界では薄膜積層による分光、反射干渉による事例が多くみられる。身近では昆虫の翅、特に蝶翅の一部に多くみられ、モルフォチョウ亜属やシジミチョウ亜属、アゲハチョウ科の翅の一部や一般的に

日産自動車株式会社総合研究所材料研究所（〒237 横須賀市夏島町1番地）
E-mail: h-tabata@mail.nissan.co.jp

表 1 構造的発色の光学物理的基本原理種とそれらに対応する動物界の発色例。

原 理	事 例
チンダル散乱現象	① 軟体動物腹足類のアメフラシ・ウミウシ等の体表の青斑——虹色素胞(iridophore)の細胞質内に0.1 μm程度の微粒子が充満 ② 昆虫類のトンボの仲間,例えばアオイトトンボの腹部の青緑色——表皮虹色素胞内の80 nm程度の顆粒の存在に起因 ③ 七面鳥・マンドリルの顔面の青い紋様, シャムネコ・西洋人の碧眼——虹彩の黒色素胞中の小型メラニン顆粒の存在に起因
薄膜干渉現象	① ホタルイカ・イイダコ等の皮膚の紋様——虹色素胞内の反射小板の屈折率・枚数・間隔と小板間液の屈折率に依存 ② トカゲ・カメレオン等の爬虫類の虹色素胞 ③ 昆虫の翅の一部
回折現象	① 孔雀の羽毛やエビの殻など,表皮細胞の生成物(ケラチン・キチン等)の微細な線条や凹凸に起因

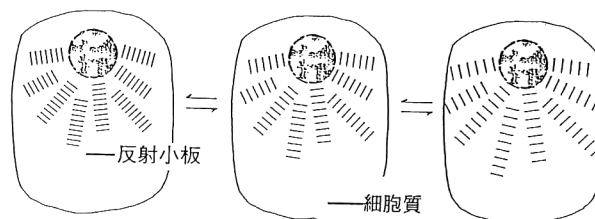
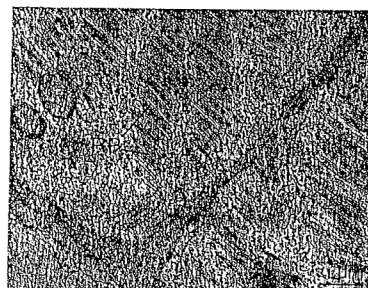


図 1 ルリスズメダイの虹色素胞と機能モデル：運動性の構造的発色例として、上図に虹色素胞の電子顕微鏡写真を、下図に低屈折率の細胞質内に存在する高屈折率の反射小板（板状結晶）が積層し、その積層間隔がダイナミックに変化するモデルを示す。

は色素発色であるシロチョウ科の一部などで知られている³⁻⁵⁾。

1.2 運動性の構造的発色

生物の体色発現のひとつは、前述したように、いろいろな種類の色素胞と呼ばれる細胞の存在である。色素胞の中の「黒色素胞」や「赤色素胞」は、それらの内在色素により発色するもので、一般的にいう物体色と同等と考えてよい。しかし、1980年代に入って熱帯性魚類や両生類などの「虹色素胞(iridophore)」と呼ばれる色素胞が、その低屈折率の細胞質内に高屈折率特性をもつ多数の反射小板(板状結晶)をもち、それらがある刺激入力により規則的に並び換えることによる反射干渉システムを形成していることが明らかになってきた。このメカニズムについて、藤井らは熱帯性魚類を用いて詳細に検討している²⁾。

珊瑚礁に生息するコバルト色のルリスズメダイの体表(真皮)には長楕円状の虹色素胞(約11 μm×約16 μm)がタイル貼り状に整然と並んでいる。図1にルリスズメダイの虹色素胞と機能モデルを示した。屈折率約1.37の細胞質と屈折率約1.83の反射小板(厚さ約5 nm)が多層薄膜構造を形成し、それらが核に向かって放射状に存在する。この反射小板間隔は交換神経伝達物質であるノルエピネフリンとよばれる物質の放出量によって制御され、例えば反射スペクトルピークの位置を380 nmから530 nmへと瞬時にシフトできるシステムが構成されている。この場合は反射小板間距離、すなわち光学的厚みをダイナミックに変えられる構造的発色システムといえる。

1.3 非運動性の構造的発色

最初に述べたように、異方性反射特性(アニソトロピック特性)、すなわち見る角度によって色みが変わる視対象物の多くが構造的発色形態をもっているといって過言ではない。ここでは鮮やかな発色を呈している蝶翅について述べる。蝶翅の発色は、一般的には含有色素によるものが多く、翅膜中や鱗粉中などその存在部位についてもいくつかのモデルが提唱されている⁶⁾。全体的には含有色素による場合でも翅背面(upper surface)の一部の模様が青や緑あるいは黄色などに発色している翅をよくみかけるが、動物の場合には可視光下でそのような発色機能の色素合成能が基本的にないため、何らかの構造形態が関与しているケースがきわめて多い。

本節では、その代表例として南米産の青色から青紫色に輝くモルフォ蝶翅(タテハチョウ科,モルフォ亜属)、特にスルコウスキーモルフォを取り上げて、その光学的特性について、化学的、形態学および分光学的、さらに色彩心理学的評価を加味してその特徴を概観する。

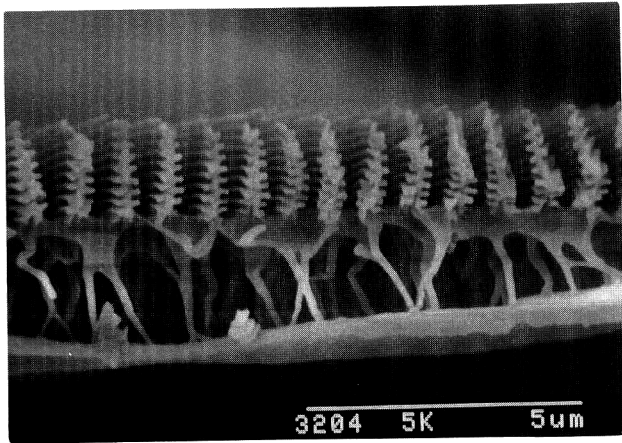
1.3.1 含有色素の影響

モルフォ蝶翅の発色については、1900年代初頭に干渉発色と記述されたのが最初と思われる。しかし、理論的に証明されたわけでもなく、含有色素についても不明であった。後者については筆者らの蛍光顕微鏡観察により、翅膜部位ではなく、翅膜上に整然と配列する鱗粉に蛍光色素が存在することがわかった。そして高速クロマトグラフィーを中

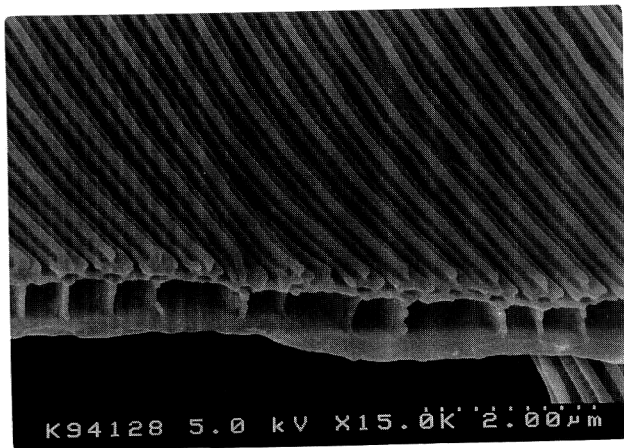
表 2 モルフォ蝶翅内のプテリジン含有量：高速液体クロマトグラフィー法による雄のスルコウスキーモルフォ、アドニスモルフォ蝶翅各々1頭当たりの含有量の定量分析結果。

	翅重量 (1頭当たりの平均重量：mg)	バイオプテリン	プテリン (1頭当たりの翅内平均含有量：pmol)	イソキサントプテリン
スルコウスキーモルフォ	253±19	1030±430	459±183	150±57
アドニスモルフォ	293±14	2890±600	363±98	157±99

(試料頭数：各4頭)



(a)



(b)

図 2 モルフォ蝶翅の前翅背面の鱗粉断面走査電子顕微鏡写真。(a) スルコウスキーモルフォ (♂) のカバースケール、(b) アドニスモルフォ (♂) のカバースケール。

心とした翅の化学分析によって、蝶翅から成長制御に関わるバイオプテリンが初めて検出され、その他に数種のプテリジン系補酵素(蛍光色素)が見いだされた⁷⁾。その結果を表2に示すが、きわめて微量であり、自然光下での視覚的認知には全く関与していないことがわかる。

1.3.2 モルフォ蝶翅の鱗粉構造

蝶翅表面には、カバーおよびベーサルスケール (cover scale, basal scale) とよばれる大きさの異なる2種類の鱗粉が、翅膜上のソケット (socket) とよばれる孔に交互に規則的に配列している。スルコウスキーモルフォ

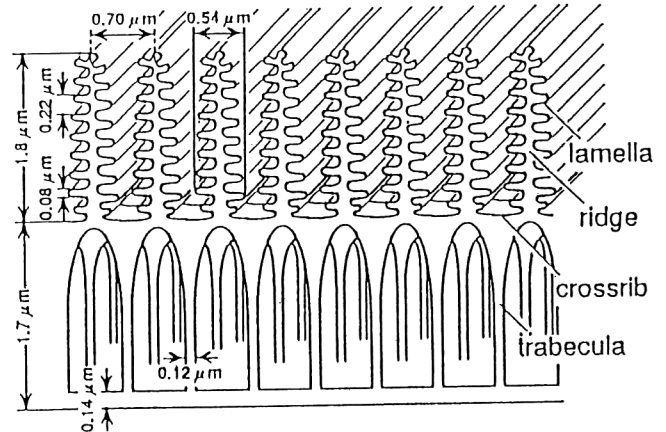


図 3 スルコウスキーモルフォ (♂) のカバースケール断面模式：鱗粉断面形態と寸法諸元を示す。

(*Morpho sulkowskyi*) およびアドニスモルフォ (*Morpho adonis*) の両鱗粉 (scale) はほぼ透明であり、それらカバースケール (cover scale) の走査型電子顕微鏡 (SEM) による断面形態を図2に示す。

スルコウスキーモルフォの断面形態は特異的であり、トラベキュラー (trabecula) とよばれる台座上にリッジ (ridge) とよばれる幹部と、枝のようなラメラ (lamellae) 部が形成されている。この形態模式図を図3に示す。リッジの繰り返し方向を x 軸方向、奥行き方向を y 軸方向、ラメラの積層方向を z 軸方向とすると、本鱗粉の断面構造の全体的な特徴は、(1) x 軸方向に周期的、(2) y 軸方向に一樣、(3) z 軸方向に層構造、ということが出来る。さらに詳細にみると、 z 軸方向のラメラの厚みは約 $0.08 \mu\text{m}$ 、ラメラ間は空気層を挟み $0.14 \sim 0.16 \mu\text{m}$ 程度であり、またクチクラで構成されているラメラの屈折率はほぼ $1.4 \sim 1.5$ 程度である。すなわち、 z 軸方向は屈折率の異なる2種類の物質の交互積層で構成されていることになる。これらのことからスルコウスキーモルフォ蝶翅の鱗粉は、干渉発色現象を呈する可能性を示唆していることがわかる⁵⁾。

1.3.3 鱗粉断面の光学モデル計算と分光特性

図3の断面構造 (スルコウスキーモルフォ蝶翅の鱗粉) から段階的に数種の光学モデルを考えることができるが、その中で z 軸方向に注目し、 x 軸方向の繰り返しを連続として最も単純化したモデルを図4に示す。

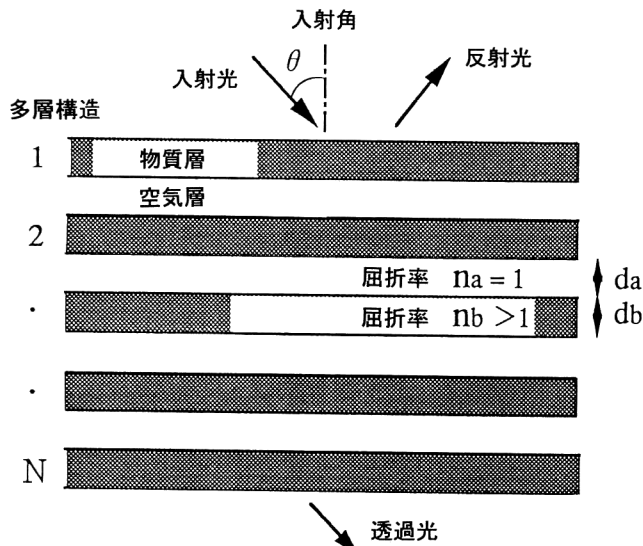


図4 スルコウスキーモルフォ (♂) のカバースケール断面形態の基本的光学モデル：空気層と物質層の交互積層構造であることを示す。

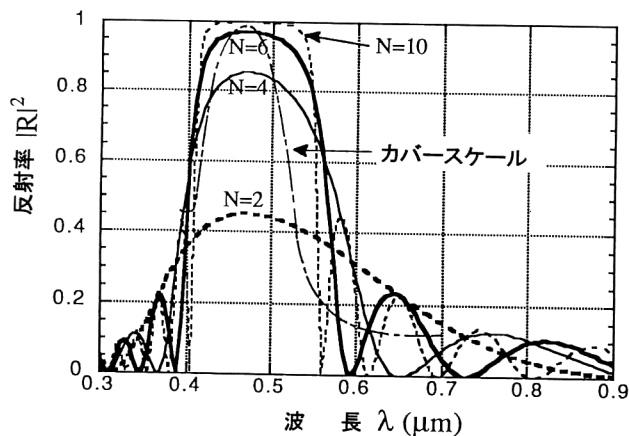


図5 層枚数変化による反射スペクトル計算と実測反射スペクトル測光試料：スルコウスキーモルフォ (♂) のカバースケール，光学系：入射角 0° -受光角 0° 。

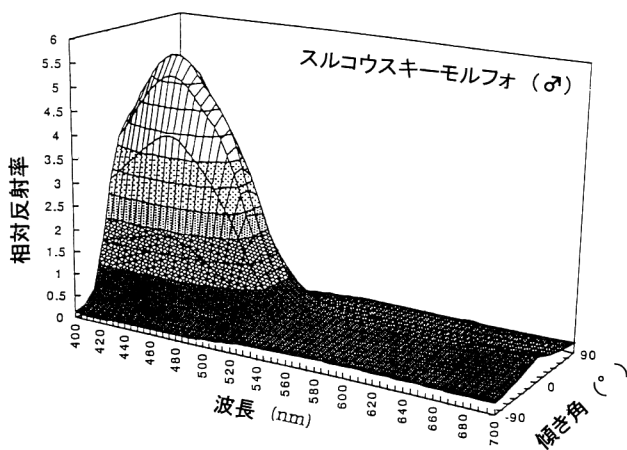


図6 蝶翅の3次元変角分光反射スペクトル。測光条件：入射角 -45° ，受光角 30° ，あおり角 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。

ここで空気層の厚さを d_a 、物質層 (lamellae) の厚さを d_b 、空気層の屈折率を n_a 、物質層の屈折率を n_b 、光の入射角を θ 、物質層の枚数を N としたとき、入射角 0° -受光角 0° の光学系において、反射スペクトルのピーク波長は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \lambda &= 2(n_a d_a \cos \theta_a + n_b d_b \cos \theta_b) \\ &= 2n_a \{d_a \cos \theta_a + d_b (n_b/n_a) \cos \theta_b\} \end{aligned} \quad (1)$$

上記条件においては、

$$\lambda = 2n_a \{d_a + d_b (n_b/n_a)\} \quad (2)$$

となる (詳細は Huxley の解析を参照されたい⁸⁾)。

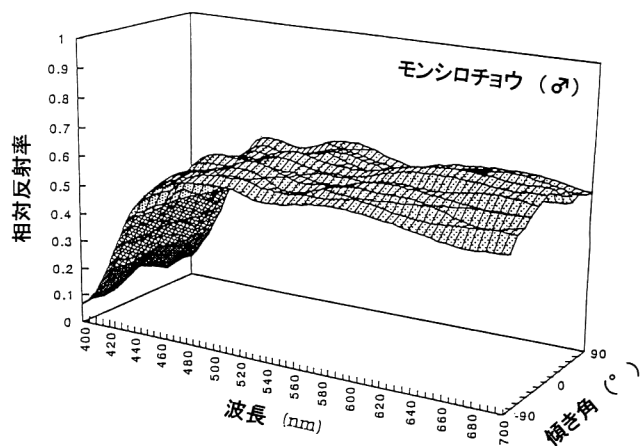
また、空気層と物質層の光学的厚みが等しいとき、反射波長は次式で表わされ、反射強度が最も強くなる。

$$\lambda = 4n_a d_a = 4n_b d_b \quad (3)$$

前述の光学モデルを用い、光学系は垂直入射条件とし、構造解析により得られた各々の諸元 ($d_a = 0.12 \mu\text{m}$, $d_b = 0.08 \mu\text{m}$, $n_a = 1.0$, $n_b = 1.5$, $N = 2, 4, 6, 10$) を基に計算したスペクトルの一例とスルコウスキーモルフォ蝶翅のカバースケールを顕微分光装置により測定した分光スペクトルを図5に示す。ここでみられるように計算例と測光例はきわめて高い一致性を示すことから、図2および図3に示した複雑な表面形態が基本的には多層薄膜による反射干渉機構をもっていることがわかる。ちなみに図5において、物質層の屈折率や厚さが種々異なった場合、同様の計算によって、屈折率や厚さが大きく、また厚くなるに伴い最大波長ピークは長波長側へ移行することもわかる。

1.3.4 蝶翅の3次元光学特性

前節の計算および測光は、すべて光の垂直入射条件下であった。しかし、図2に示したように鱗粉の断面形態は非常に複雑であり、その構造を最も単純化した図4でみても入射角により干渉反射光路長が異なることから、受光角によってそのスペクトルが異なること、すなわち、観察角度



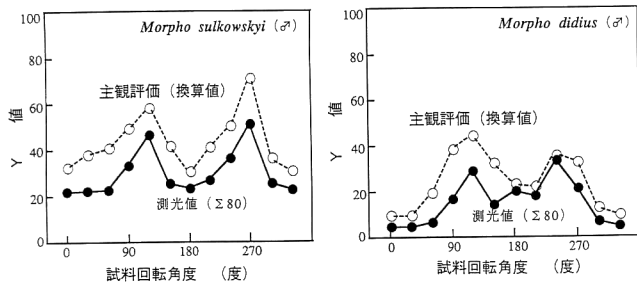


図7 蝶翅の測定値と主観評価のグレースケールにおける「明るさ感」比較。測光条件：入射角 0° ，受光角 45° （＝観察角）。

により色みを変化させていることが容易に推測できる。その一例として、図6に筆者らが開発した広角度3次元変角分光色彩計⁹⁾(光束；約8mm)を用いて雄のモンシロチョウ (*Pieris rapae* L) とスルコウスキーモルフォの翅背面を測光した例を示す。高精度の3次元光学プロフィールは、試料表面の粗さなどの物理的特性と分光反射率、さらには色という心理量を同時に評価でき得る可能性があり興味深いものがある。前者は白に近い黄白色で、翅表面は艶消しのマット状にみえ、異方性反射特性はない。プロフィールはそれをよく表わしているといえよう。後者の場合は、430～480nmに最大ピーク波長をもち、特定の反射角度にきわめて強い異方性反射特性（標準白色板に対して数倍）を示すだけでなく、その角度依存性もシャープである。つまり、入射角に対してある特定の方向に非常に強い反射干渉制御をしている、ともいえる。

2. 構造的発色と主観評価

本節では、生物の光制御に関するひとつの機能発現である構造的発色とそれに対する人間の視知覚的問題を取り上げた。図2に示したような断面構造をもつ鱗粉およびそれらが翅膜上に精緻に配列された翅背面は、観察角度によって色みや明るさが変化する。ここでの評価方法としては、光入射角-受光角を 0° - 45° と一定させ、翅膜のソケット部を起点として試料を回転させ測光し（使用機器：日本電色工業製分光色差計，SZ-Σ80），測定明度値からグレースケールのY値を計算する。さらに、同様の回転角方向から官能評価を行い、その感覚に近い色票を選択して、その色票の分光スペクトルから同様の方法でY値を計算する。それらの結果を図7に示す。いずれの観察角度においても、主観評価のほうが明るく感ずる傾向を示している。すなわ

ち、見かけ上、彩度が上がっているように見えていることを意味している⁵⁾。

3. 今後の展望

蝶翅の光制御機能という点では、構造的発色機能だけでなく、ラメラの厚みと翅表面に対するラメラの角度等との関係から紫外線領域の波長の反射制御機能も報告されており¹⁰⁾、興味ある現象が明らかになりつつあるように思われる。本稿は生物のもつ構造的な光制御機能の一端を述べたわけであるが、近年、生物機能模倣工学 (biomimetics) という観点から、光関連分野だけでなく、力学分野や情報工学分野、ロボット工学、生理学分野等々、多様な分野における新しい教科書として学ぶべき多くのものをもっている。ここ数年、実質的にいくつかの分野で生物機能をヒントに新材料や新デバイス等の研究開発が進められている。環境との折り合いの中で進化し、生存してきた生物は、基本的に環境に優しい機構を具備しているはずである。そういう意味でも生物に学んだ新技術の進展を期待したい。

文 献

- 1) 上島孝久：“動物における構造的発色”，細胞，**23**，No. 13 (1991) 501-506.
- 2) 藤井良三：“運動性虹色素胞”，細胞，**23**，No. 13 (1991) 19-24.
- 3) H. Ghiradella: “Structure of iridescent butterfly scales,” Ann. Entomol. Soc. Am., **77** (1984) 637-645.
- 4) H. Ghiradella and W. Radigan: “Development of butterfly scales,” J. Morphol., **150** (1976) 279-298.
- 5) H. Tabata, K. Kumazawa, M. Funakawa, J. Takimoto and M. Akimoto: “Microstructures and optical properties of scales of butterfly wings,” Opt. Rev., **3** (1992) 139-145.
- 6) 三枝豊平, 矢田 脩, 上田恭一郎：“蝶類学の最近の進歩”，日本鱗翅学会特別報告，第6号 (1988) 427-446.
- 7) H. Tabata, M. Hasegawa, M. Nakagoshi, S. Takikawa and M. Tsusue: “Occurrence of biopterin in the *Morpho* butterflies,” Experientia, **52** (1996) 85-87.
- 8) A. F. Huxley: “A theoretical treatment of the reflexion of light by multilayer structure,” J. Exp. Biol., **48** (1968) 227-245.
- 9) 田畑 洋, 舟川政美：“三次元測色法と塗膜の光学特性”，塗装工学，**30**，No. 8 (1995) 334-338.
- 10) H. Ghiradella, D. Aneshansley, T. Eisner, R. Silberglied and H. Hinton: “Ultraviolet reflection of a male butterfly: Interference color caused by thin-layer elaboration of wing scales,” Science, **178** (1972) 1214-1217.

(1997年8月28日受理)