

# 自然界にみられる構造色

小倉繁太郎・大藪 雅史

## Structural Color in Nature

Shigetaro OGURA and Masashi OHYABU

Various studies on structural color from its cradle to up-to-date stages are reviewed, searching the exact concept of structural color. Then, optical principles accrue to structural color from specimen's structure observed are discussed. Finally, a possible direction of the study on structural color hereafter is suggested shortly.

**Key words:** structural color, butterfly, beetle, ammonite, interference, diffraction

近年、生体などの構造色に関する研究・開発が活発化している。自然界には光の波長程度の規則的な微細構造があり、光と微細構造の相互作用、すなわち回折・干渉・散乱などの結果として構造色が現れる。本報告では、構造色の研究がどのような経過をたどってきたか、その発端から現在までの諸例を眺め、そこから光学現象として観測されている構造色の発色機構を横断的にまとめ、最後に筆者らが手がけた試料での結果を報告する。

### 1. 欧米および日本における構造色研究

#### 1.1 構造色研究の黎明期

構造色研究の発端は、iridescent color (光沢) や structural color (構造色) などの術語を使用していないが、Newton<sup>1)</sup> の“*Opticks*”まで遡る。Newton は、クジャクの透明な尾羽の部分の色が見る方向を変えると変化し、その様相は透明な薄板の場合と同様であると指摘した。Newton 以外の初期の構造色の検討試料に鳥の羽根が多用された理由もこれで理解できる。この後、Rayleigh<sup>2)</sup> の論文にゼラニウムの花の色に関する記載があり、ゼラニウムの花の構造色を意味しているともとれる。しかし、彼の関心は昆虫が花の色をいかにして認識するかにあった。生体である昆虫(蝶・甲虫 [コウチュウ] など)に関する色を最

初に検討したのは Poulton<sup>3)</sup> および Hopkins<sup>4)</sup> で、それぞれ植食性幼虫の体色と植物の色との相関、およびシロチョウの排泄物と生体の飾りに関連させて生体色素を検討した。ただし、両者ともに昆虫の構造色に関してではない。また、Stokes<sup>5)</sup> は、薄板から構成される積層体からの反射に関する理論的考察を 1862 年にはじめて報告した。

1911 年に出た Mallock<sup>6)</sup>、Michelson<sup>7)</sup> およびその後の Rayleigh<sup>8,9)</sup> および Onslow<sup>10,11)</sup> の論文では、構造色を意味する言葉として iridescent color が用いられている。また、Wood<sup>12)</sup> は、試料表面に Na や K の粒子が存在し、散乱の結果 iridescent color が生じると論じた。iridescent = structural と解釈すれば、1911 年の Mallock と Michelson が構造色の検討をいち早く始めたといえよう。structural color という術語をはじめて使用した論文は、1923 年の Mason<sup>13-15)</sup> であった。ただし、1911 年に出版された Folsom<sup>16)</sup> の「昆虫学」には、structural color という英語の術語と、その訳語として構造色という名称が明確に使用されている。したがって、構造色の術語は 1910~1923 年ごろに米国で使用されはじめ、日本にも比較的早く伝わっていた。しかし、日本では長いこと、この術語に関心がもたれなかったようである。

Folsom<sup>16)</sup> は、蠅の羽根と石鱗膜の虹色を比較し、透明な

薄膜で虹色が生じ、また蝶の鱗片にある細かい密な平行した線条により分光される結果、すなわち干渉と回折により構造色が生じると述べた。後に定説となった Rayleigh<sup>8,9)</sup>の詳しい波動光学理論(回折・干渉)が導入される前に、Folsom は現在でもほとんどそのまま通用する構造色の定義を含んだ論述を展開している。

## 1.2 構造色の化学的検討

その後、構造色に関する論文に、アメリカでは構造色(structural color)が、またヨーロッパでは光沢(iridescent color)が一般化した。まず Mason<sup>13-15)</sup>は、1923~27年に一連の昆虫に関する報告を出した。Masonの論文で特筆すべきは、論文中にほとんど図・表がなく、しかもおもに化学的手法により構造色を詳細に解明しようとした点である。当時唯一可能であった生体の微細構造を観察する光学顕微鏡さえほとんど使用せずに、構造色解明に画期的な結果を得た。彼の得た結論で最も重要なのは、蝶や昆虫(特に甲虫)の構造色が生体の羽根や外皮の微細構造である多層膜での干渉による結果とした点である。

## 1.3 透過型電子顕微鏡による微細構造の検討

1940年代から、構造色に深く関連した生体の可視光波長程度の微細構造の透過型電子顕微鏡による検討が新たに始まった。先鞭をつけたのは Kalmus<sup>17)</sup> および Anderson と Richards<sup>18)</sup> であり、後者は透過型電子顕微鏡による甲虫および蝶の鱗粉の写真を始めて示した。1950年代には Gregoire<sup>19)</sup>による真珠母貝の観察、Lippert と Gentil<sup>20)</sup>によるモルフォ蝶、1960年代には Greenwalt ら<sup>21,22)</sup>のハチドリ羽根の断面構造(多層膜)、Bernhard と Miller<sup>23)</sup>による昆虫複眼の網膜突起に関する構造写真などが続々と公表された。また、Denton と Nicol<sup>24)</sup>による魚のウロコの構造色に関する論文、Land<sup>25)</sup>のホタテ貝の眼で生じる多層膜干渉による反射率の検討、Neville と Caveney<sup>26)</sup>による甲虫(arabaeid)の外皮がコレステリック液晶の構造と同様であることなど、画期的な報告が続出した。また、Stokes<sup>5)</sup>の論文を引き継いで、Huxley<sup>27)</sup>による詳細な多層膜からの反射率シミュレーション法が導入された。1969年には、鹿児島大学の Hirata と Ohsako<sup>28)</sup>による日本ではじめての蝶の鱗片と昆虫の体毛の構造色研究が報告された。また、Hinton ら<sup>29,30)</sup>によるジガバチやオサムシ(carabid beetle)の回折格子構造の電子顕微鏡写真や、Wasserthal<sup>31)</sup>による蝶の鱗粉が体温調整に関与するという予測がなされた。さらに、Huxley<sup>32)</sup>による Becke line 法を採用した鱗粉の屈折率測定の試み(空気層=1.00, 膜実質層=1.57)、およびザルモクシスオオアゲハ(*Papilio zalmoxis*)に tyndall blue が存在するという報告がなされた。ここで

Becke line 法とは、もともと鉱物を比較するために屈折率を調べる顕微鏡試験法で、顕微鏡の鏡筒を上げると、ベッケ線がより高い屈折率の鉱物のほうに移動する原理に基づいた屈折率測定法である。また、tyndall blue とは、光の波長より大きな粒子の存在により生じる散乱の結果呈する青色を意味する。Haas<sup>33)</sup>はさらに、甲虫表皮にアモルファス粒子(trifolium hybridum)が存在し、その結果散乱により構造色が現れると指摘した。Denton<sup>34)</sup>の解説を引用したうえで、木下<sup>35)</sup>は、魚のウロコの反射に関する興味深い解説を提示した。両解説は、今日でも魚のウロコの構造色を検討する際の重要な出発点である。また、Pope<sup>36)</sup>は、甲虫の外皮に関する紫外線の反射をはじめて観察した。

## 1.4 構造色を測色する機器の開発

さらに、Mossakowski<sup>37)</sup>はツァイスの反射分光計 PMQ II を改造し、測定試料径 1 mm $\phi$  に対する反射率の計測をはじめて可能にした。しかし、構造色の反射率測定は、蝶の鱗粉や甲虫の表皮に存在する細かで複雑なパターンに煩わされずに、微小な各部分の反射率を、できれば入射角を変えて測定する必要がある。Tabata ら<sup>38)</sup>は、 $+/-90^\circ$ の入射角範囲での三次元測色法の開発を実施し、構造色測定の代表的な機器の確立に至った。また小倉・大藪<sup>39)</sup>は、測定光の直径 27  $\mu\text{m}\phi$  (ただし、入射角:固定)での微小面積での測色、および 0.1 $\times$ 0.1 mm/ピクセルごとで試料面積、40 $\times$ 40 mm、全面にわたって二次元測色(入射角:0, 10, 20 $^\circ$ の3段階切り替え)を可能とした。今後、昆虫の擬態あるいは蝶・甲虫の二次元色彩パターンの解析などに利用されよう。なお、植物の構造色に関しても、Rentschler<sup>40)</sup>や Kuhn<sup>41)</sup>による報告がなされた。

## 1.5 走査型電子顕微鏡による微細構造の検討

1985年ごろから透過電子顕微鏡に代わり走査型電子顕微鏡が使用されはじめ、1985年に Schultz と Rankin<sup>42)</sup>は、ハンミョウ(tiger beetles *Cicindela*)の多層膜断面構造を報告した。走査型電子顕微鏡の出現により、従来の透過型電子顕微鏡の場合に必須な生体の煩雑な化学的前処理やレプリカ製作が不要になり、かつ焦点深度の深い微細構造の観察が容易に行えるようになった。また、Steinbrecht ら<sup>43)</sup>は生体の微細構造を光学薄膜同様多層膜構造と仮定し、モデルに基づく反射率シミュレーションを試みた。1990年代になると、Giradella<sup>44)</sup>および Heilman と Miaoulis<sup>45)</sup>は、生体の構造に基づく光学薄膜素子(例えば太陽光選択集光器)の設計・評価技術としての反射率シミュレーション法の有効性を検討した。日本でも、すでに Ohsaki<sup>46)</sup>が3種のシロ蝶(*Pieris*)を試料として、構造色の体温調整への機能を太陽光輻射の点から検討した。

御木本幸吉による真珠養殖の成功もあって、古くから日本の真珠養殖技術と光沢測定法は進んでいた。例えば、蓮ら<sup>47,48)</sup>による一連の真珠の生育に関する報告や、蓮沼<sup>49)</sup>、金井<sup>50)</sup>および相田<sup>51)</sup>による真珠の光沢および測色法に関する報告がなされた。真珠がレンガブロック状の多層膜で構成されていることを周知せしめたのは和田<sup>52)</sup>である。この後の真珠の構造色、すなわち光沢などの光学特性については、3章1節で筆者らの研究例として述べる。

比較的最近では、MiaoulisとHeilman<sup>53)</sup>、BrinkとLee<sup>54)</sup>、および木下・吉岡ら<sup>55,56)</sup>は、モルフォ蝶の見事な電子顕微鏡写真の撮影に成功した。また、KoonとCrawford<sup>57)</sup>はMiaoulisとHeilman<sup>53)</sup>と逆に、多層膜構造が太陽光集光機能をもたないと論じた。

### 1.6 波長程度の微細構造の応用

1990年代は構造色の新しい段階が開かれはじめた時期である。具体的には、NevilleとCaveney<sup>26)</sup>の指摘を引き継ぎ、渡邊<sup>58)</sup>は玉虫の表皮の構造がコレステリック液晶と類似しており、かつこの生体構造を旋光に基づく光機能素子への応用として検討した。このように最近の研究動向は、構造色自体の検討ばかりでなく、むしろ光の波長と同程度の生体微細構造を先端光機能素子（特に、レーザーおよびphotonic crystalなど）へ応用しようとする傾向が顕著である。例えば、大桃<sup>59)</sup>は玉虫について、Vukusicら<sup>60)</sup>はモルフォ蝶についての構造特有の切れ込みのある多層膜に関連した光学効果について、古知<sup>61)</sup>はオオセンチコガネの金属光沢、田村<sup>62)</sup>は二次イオン質量分析法により玉虫色の解明を、田畑ら<sup>63)</sup>は干渉（＝構造色）発色繊維の断面構造設計についてそれぞれ検討した。さらに、Brinkら<sup>64)</sup>は貝殻（*Helcion pruinosus*）の構造色を、Laurenceら<sup>65)</sup>はかすめ角入射による構造色検討などを報告した。ごく最近、McPhedranら<sup>66)</sup>は、環形動物の一種であるコガネウロコ（sea mouse）の体毛・繊毛などの繊維状試料に観察される微細構造が、photonic crystalそのものであると報告した。これらの諸例は大変興味深く、近い将来構造色としてではなく、生体の微細構造の新規光素子への応用として研究が活発化しよう。

## 2. 構造色発色機構

構造色研究の発端から現在までを簡単にみてきた。これらの諸例から、構造色がなぜ生じるのかもある程度明らかになってきた。すなわち、すでに周知な光学現象、特にシャボン玉<sup>67)</sup>（石鹼水の単層膜）と、高・低2種類の屈折率から構成される交互多層膜として知られる各種光学薄膜<sup>68)</sup>での干渉、あるいはCD盤、ホログラム（シート）での回

折などと類似の現象とみなせる。そして、生体あるいは無機物に多層膜や回折格子構造がどのように搭載されているかで違いが出てくる。

ここで、微細構造が光の波長と同程度の寸法で規則的に繰り返されている場合に、構造色がどのように現れるか簡単に述べる。インコヒーレントな白色光がこのような規則的な構造に入射すると、2つの異なる屈折率の交互層から構成される多層膜の場合でそれぞれの光学膜厚がほぼ一定であれば、反射率極値はある波長で顕著なピークを示す。もし、各層の膜厚が層ごとに違っていれば、ある波長の範囲で低いピークが生じ、構造色も顕著にならない。すなわち、顕著な構造色として現れるためには、交互層各層の膜厚が高・低屈折率層それぞれで一定にそろえることが肝要である。一方、規則的な構造が回折格子の場合も、一定のピッチで格子が構成されるほど、観測点あるいは入射角を固定すると輝度の高い単一の回折光が得られる。異なるピッチがあればあるほど、それぞれのピッチに対応した回折光は広がり、その結果輝度は低下する。

構造色が現れる回折・干渉などの典型的な諸例について図1に示した<sup>39)</sup>。図1(A)回折の右側のブレード型で回折効率が飛躍的に増大する点、(B)干渉の右側に示した昆虫などの表皮で生じる傾斜基板からの干渉、真珠多層膜からの反射には広い範囲の入射角に対する積分効果を考慮すべきなど、従来の光学薄膜では未検討の事項もあり、反射率シミュレーション法の取り扱いに注意が必要である。

黒色や白色の構造色は未検討であるが、シャボン玉膜の頂点に現れる黒色<sup>67)</sup>や、のちほど触れる黒真珠は興味深い例である。前者について、立花<sup>67)</sup>は、頂点近傍の黒色部の膜厚が可視域の短波長端の波長より薄ければ、干渉の結果現れるピーク波長は可視域の短波長端より短い波長で出現するので、現れる色は黒くなると指摘した。一方、後者では、真珠層に含まれる生体色素の減色混合により三原色の割合が膜厚に関係なく等しければ黒色を呈する。

## 3. 筆者らによる研究例

### 3.1 真 珠

筆者らが構造色に関心をもったきっかけは、真珠と光学薄膜の多層膜構造が類似していた<sup>69)</sup>からである。白真珠が宝飾品として最も一般的であるため、真珠の光沢を決定する光学特性の検討は、現在までそのほとんどが白真珠を対象にして行われた<sup>52)</sup>。最近では、白真珠以外に黒真珠も宝飾品として定着した。小松ら<sup>70)</sup>は、両者の光沢に関して新しい光学測定法を開発中である。黒真珠の黒色は、真珠層を載せる真珠核自体は黒色でなく黄色であり、真珠層が黒

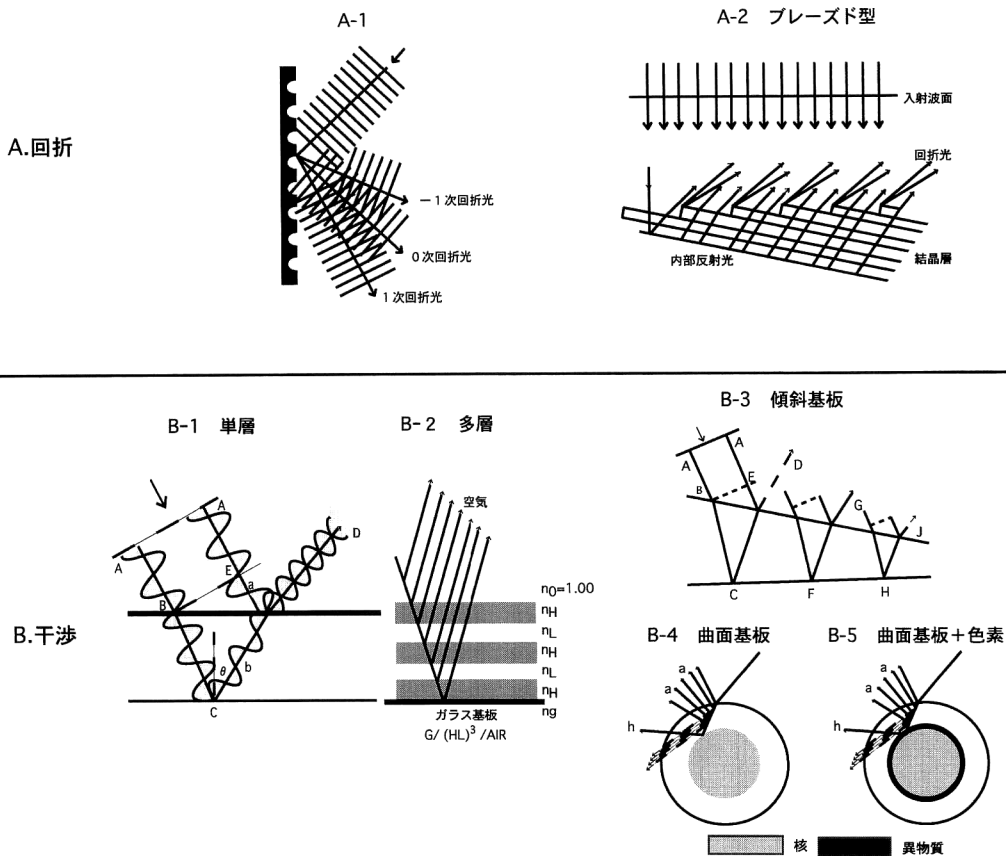


図1 構造色発色メカニズム (ただし, 散乱を除く).

色を示すこともわかってきた。また、黒真珠をつくりだすクロコウ貝は3種の色素を分泌し、それらの色素が交互に重なっていくために減色混合で黒色が生成されるという考えを2章で述べた。黒真珠以外にも、金色真珠(天然および養殖)が新たに市場に登場しはじめている。また、白真珠の一種であるピンク色真珠も含めて、これらの真珠の断面構造および構造色に関する結果(マルチヒストグラム、擬似カラー、および微小面積測色など)を別途報告する予定<sup>71)</sup>である。

### 3.2 魚のウロコ・蝶・蛾の鱗粉

魚のウロコはDenton<sup>34)</sup>や木下<sup>35)</sup>がすでに論じているが、筆者らもイワシ・スズキなどの例<sup>72)</sup>を報告した。最近試みたクロダイのウロコの電子顕微鏡観察では、構造が、ウロコの表面の回折格子と断面の交互多層膜のハイブリッド構造であることがわかった。

現在までに検討された構造色に関する諸例では、試料として蝶の鱗粉や甲虫の表皮が多用されている。筆者ら<sup>72)</sup>

も、蛾(シモフリスズメ)・蝶(アゲハ蝶およびツマムラサキマダラ)の微細構造を検討した。シモフリスズメでは赤外域の波長に対応する一次元の、アゲハ蝶では互いに直交した可視域と赤外域の波長に対応する二次元の、そしてツマムラサキマダラでは同じく互いに直交する紫外域、可視域、および赤外域の波長に対応する三次元の回折格子構造を、それぞれもつことがわかった。

### 3.3 昆虫(現生および化石)

現生の3種の甲虫(*Pseudochalthea planiuscula*, *Stemocera laevigata* および *Cardiaspis mouhoti*)について、微細構造とマルチヒストグラム、二次元擬似カラー表示、および微小面積測色結果を報告した<sup>73)</sup>。微細構造は、典型的な多層膜構造を示すことがわかった。このほか、エゾコガムシ(*Hydrochara libera*: 現生および化石)の構造色解析の結果もすでに報告した<sup>39)</sup>。

### 3.4 化石

化石の構造色については、現在検討中のオウム貝(*Nauti-*

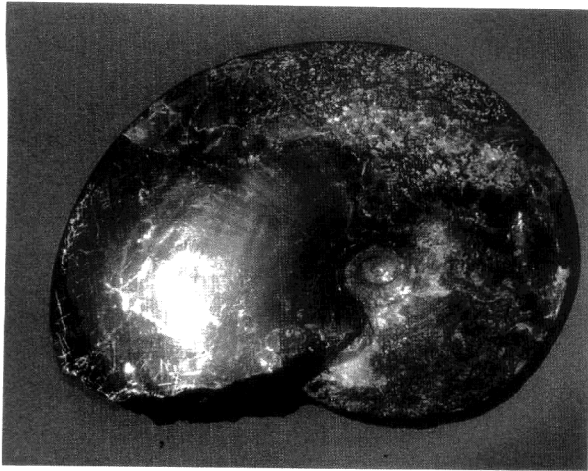


図2 典型的な構造色を示す虹色アンモナイトの全姿。(カラー口絵参照)

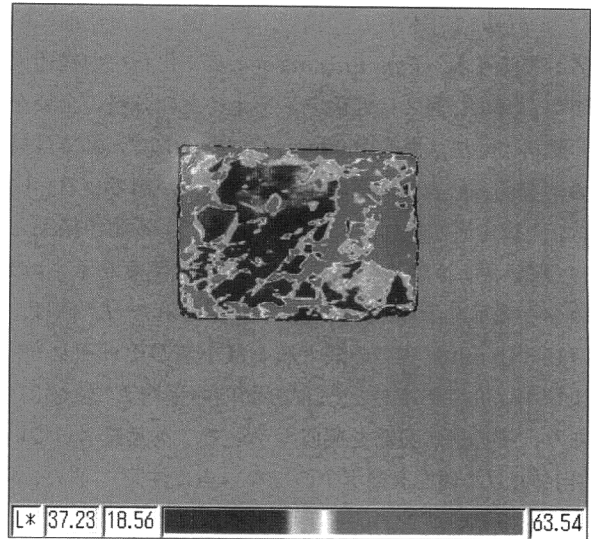
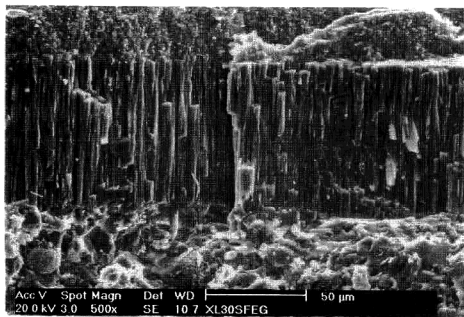
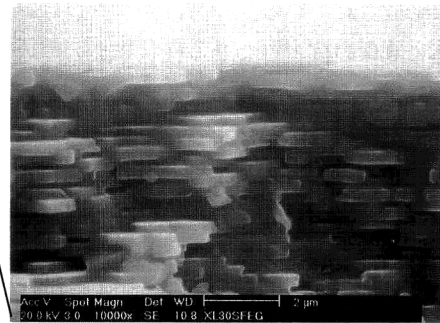


図3 図2に示す試料の一部(左側光っている部分)を切り出し、二次元測色システムで測色した試料表面のL\*値の擬似カラー表示。(カラー口絵参照)



columnar structure,  $\approx 100 \mu\text{m}$   $\times 500$



pearl structure 拡大  $\times 10000$

図4 アンモナイト (*Placenticerus meeki*) の断面 SEM 写真 (XL30FEG 使用)。右側：部分拡大図。

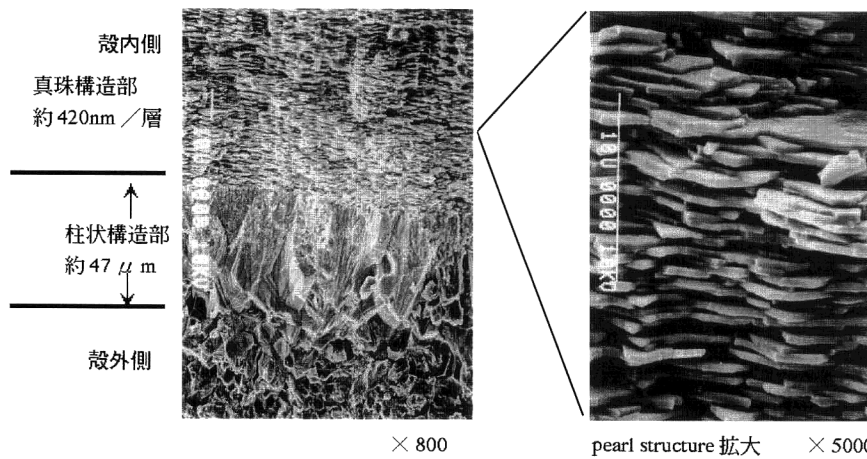


図5 オウム貝 (*Nautilus pompilius*) の断面 SEM 写真 (ESM-3200 使用)。右側：部分拡大図。

*lus pompilius* : 現生) と同属で, 約 4 億 5 千万年前に滅びたアンモナイト (*Placenticerias meeki* : 化石) の構造色解析<sup>74)</sup> も試みた. 図 2 に虹色アンモナイトの試料の全姿を示す. 試料の寸法は横約 160 mm, 縦 90 mm で, 図では見えないが裏面にも表面同様の見事な構造色が出ている. 図 3 には, 1 章 4 節で触れた二次元測色機による測色結果として, ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) 表色系のうち  $L^*$  値 (明度を示す) の擬似カラー表示を示した. 図の下側に示された  $L^*$  値は, 試料 (15×10 mm) 内での最大値と最小値がそれぞれ 63.54 および 18.56 であることと, 試料面内の平均  $L^*$  値が 37.23 であり, その値の分布を擬似カラーで二次元表示している (色自体は  $L^*$  値を直接示すのでない点に注意). また, 図 4 および図 5 に, アンモナイトとオウム貝の微細構造をそれぞれ示す. 参考までに, 両者と真珠の場合の構造の違いを述べておくと, 真珠は偶然 (母貝の一部=真珠層) または意図的 (真珠層ないしアモルファス層) に異物として貝内部に挿入された核にレンガブロック状の真珠層が形成される. これに対し, アンモナイトでは, 中心部が厚いアモルファスな部分となっており, その両側に柱状構造と次いで真珠層が対称的に形成されている. 一方, オウム貝は巻貝であり, 貝殻自体に真珠の核とみなせる柱状構造の厚い部分があり, 断面の外側に向かってはアモルファス層が, また貝殻内側の方向では, 外部からはまったく見えないにもかかわらず真珠層が存在する. このような構造の違いが, どのような効果をもたらすのか, 謎は深まるばかりである.

構造色研究の生い立ちから現在まで, 自然界にみられる構造色の諸例と発色機構について眺めてきた. ようやく生体特有の事実を踏まえて, 光学薄膜で確立した反射率シミュレーション法<sup>43,45,65,68)</sup>を試みる段階に達したと感じている. 従来のシミュレーションの域を脱するためには, Huxley<sup>32)</sup>が行った Becke line 法などを採用して, 生体の微小部分の屈折率を実測することも必須となろう. 入射角を変えて試料の微小部分の反射率を測定することが可能になった<sup>38,39)</sup>ので, 屈折率の実測とあわせて, 今後さらに詳細な構造色の検討が進むことを期待したい.

## 文 献

- 1) I. Newton: *Opticks* (Dover Publ. Inc., New York, 1952) p. 231.
- 2) L. Rayleigh: "Insects and the colours of flowers," *Nature*, **11** (1874) 6.
- 3) E. Poulton: "The essential nature of the colouring of phytophagous Larvae," *Proc. R. Soc.*, **38** (1885) 269-315.
- 4) F. Hopkins: "The pigments of the pierida; A contribution to the study of ecretoly substances," *R. Soc. B*, **186** (1885) 661-682.
- 5) G. Stokes: "On the intensity of the light reflected from or transmitted through a pile of plates," *Proc. R. Soc.*, **11** (1862) 546-556.
- 6) A. Mallock: "On the iridescent colours of birds and insects," *Proc. R. Soc.*, **135** (1911) 598-605.
- 7) A. Michelson: "On metallic colouring in birds and insects," *Philos. Mag.*, **29** (1911) 554-567.
- 8) L. Rayleigh: "On the reflection of light of regularly stratified medium," *Proc. R. Soc. A*, **93** (1917) 565-577.
- 9) L. Rayleigh: "On the optical character of some brilliant animal colours," *Philos. Mag.*, **37** (1919) 98-101.
- 10) H. Onslow: "The iridescent colours of insects," *Nature*, **106** (1920) 149-152.
- 11) H. Onslow: "On a periodic structure in many insect scales, and the cause of their iridescent colours," *Philos. Trans. R. Soc. B*, **211** (1923) 1-74.
- 12) R. Wood: "Optical properties of homogeneous granular films of sodium and potassium," *Philos. Mag. London*, **38** (1919) 88-112.
- 13) C. Mason: "Structural colours in feathers," *J. Phys. Chem.*, **27** (1923) 201-251.
- 14) C. Mason: "Structural colours in insects I," *J. Phys. Chem.*, **30** (1926) 383-395.
- 15) C. Mason: "Structural colours in insects III," *J. Phys. Chem.*, **31** (1927) 1856-1872.
- 16) J. Folsom (三宅恒方, 内田清之助訳): *昆虫学* (警醒社, 1911) pp. 302-307.
- 17) H. Kalmus: "Physiology and ecology of cuticle colour in insects," *Nature*, **148** (1941) 428-431.
- 18) T. Anderson and G. Richards, Jr.: "An electron microscope study of some structural colours of insects," *J. Appl. Phys.*, **13** (1942) 748-758.
- 19) C. Gregoire: "Topography of the organic components in mother-of-pearl," *J. Biophys. Biochem. Cryst.*, **3** (1957) 797-808.
- 20) W. Lippert and K. Gentil: "Ueber Lamellare Feinstrukturen bei den Schillerschuppen der Schmetterlinge von *Urania* und *Morpho*-Typ," *Z. Morphol. Oekol. Tiere*, **48** (1959) 115-122.
- 21) C. Greenwalt, W. Brandt and D. Friel: "The iridescent colors of hummingbird feathers," *J. Am. Philos. Soc.*, **104** (1960) 249-254.
- 22) C. Greenwalt, W. Brandt and D. Friel: "The iridescent colors of hummingbird," *J. Opt. Soc. Am.*, **50** (1960) 1005-1013.
- 23) C. Bernhard and W. Miller: "A corneal nipple pattern in insect compound eye," *Acta Physiol. Scand.*, **52** (1962) 385-386.
- 24) E. Denton and J. Nicol: "The chorioidal tapeta of some cartilaginous fishes (*Chondrichthyes*)," *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, **44** (1964) 219-259.
- 25) M. Land: "A multilayer interference reflector in the eye of the scallop, *Pecten maximus*," *J. Exp. Biol.*, **45** (1966) 433-447.
- 26) A. Neville and S. Caveney: "Scarabaeid beetle exocuticle as an optical analogue of cholesteric liquid crystals," *Biol. Rev.*, **44** (1969) 531-562.
- 27) A. Huxley: "A theoretical treatment of the reflection of



- light by multilayer structures,” J. Exp. Biol., **47** (1968) 227-245.
- 28) K. Hirata and N. Ohsako: “Studies on the structure of scales and hairs of insects,” 鹿児島大学理科報告, No. 15 (1969) 49-55.
- 29) E. Hinton, D. Gibbs and R. Silberglied: “Stridulatory files as diffraction gratings in mutillid wasps,” J. Insect Physiol., **15** (1969) 549-552.
- 30) E. Hinton and D. Gibbs: “An electron microscope study of the diffraction gratings of some carabid beetles,” J. Insect Physiol., **15** (1969) 959-962.
- 31) L. Wasserthal: “The role of butterfly wings in regulation of body temperature,” J. Insect Physiol., **21** (1975) 1921-1930.
- 32) J. Huxley: “The basis of structural colour variation in two species of *Papilio*,” J. Entomol. A, **50** (1975) 9-22.
- 33) K. Haas: “Struktur und Zusammensetzung des Oberflaechenwachses von *Trifolium hybridum* L.,” Cytobiologie, **12** (1976) 215-219.
- 34) E. Denton: “Reflectors in fishes,” Science, **177** (1971) 65-72.
- 35) 木下是雄: 物理の樹 (木下是雄選集 I) (晶文社, 1995) pp. 276-294.
- 36) R. Pope: “A preliminary survey of ultraviolet reflectance in beetles,” Biol. J. Linn. Soc., **9** (1977) 331-348.
- 37) D. Mossakowski: “Reflection measurements used in the analysis of structural colours of beetles,” J. Microsc., **116** (1979) 351-364.
- 38) T. Tabata, K. Kumazawa, M. Funakawa, J. Takimoto and M. Akimoto: “Microstructure and optical properties of scales of butterfly wings,” Opt. Rev., **3** (1996) 139-145.
- 39) 小倉繁太郎, 大藪雅史: “構造色の解析 I”, 神戸芸術工科大学紀要, **01** (2002) 30-41.
- 40) I. Rentschler: “Zur Praeparation der Wachschicht von Pflanzblaettern fuer die Electronermikroskopie,” Microsc. Acta, **82** (1979) 47-52.
- 41) H. Kuhn: “Synthetic molecular organization,” J. Photochem., **10** (1979) 111-132.
- 42) T. Schultz and M. Rankin: “Developmental changes in the interference reflectors and colorations of Tiger Beetles (*Cicindela*),” J. Exp. Biol., **117** (1985) 87-110.
- 43) R. Steinbrecht, W. Mohren, H. Pulker and D. Schneider: “Cuticular interference reflectors in the golden pupae of Deane Butterflies,” Proc. R. Soc. London, B, **226** (1985) 367-390.
- 44) H. Giradella: “Light and color on the wings: Structural colors in butterflies and moths,” Appl. Opt., **30** (1991) 3492-3500.
- 45) B. Heilman and N. Miaoulis: “Insect thin films as solar collectors,” Appl. Opt., **33** (1994) 6642-6649.
- 46) N. Ohsaki: “Body temperature and behavioural thermoregulation strategies of three *Pieris* butterflies in relation to solar radiation,” J. Ethol., **4** (1986) 1-9.
- 47) 蓮 精: “真珠箔の光学的性質について”, 応用物理, **26** (1957) 15-22.
- 48) S. Hachisu and S. Okamoto: “Schiller layer in organic phase caused by pearly pigments,” Sci. Light, **11** (1962) 157-166.
- 49) 蓮沼 宏: 光沢 (コロナ社, 1960) pp. 15-20.
- 50) 金井昌邦: “真珠の色に就いて”, 応用物理, **26** (1957) 203-206.
- 51) 相田貞蔵: “真珠の光沢”, 光学, **15** (1986) 207-212.
- 52) 和田浩爾: 真珠—そのできる仕組みと見分け方 (全国宝石学協会, 1982).
- 53) I. Miaoulis and B. Heilman: “Butterfly thin films serve as solar collectors,” Morphol., Histol. Fine Struct., **91** (1998) 122-127.
- 54) B. Brink and M. Lee: “Confined blue iridescence by a diffracting microstructure; An optical investigation of the *Cynandra opis* butterfly,” Appl. Opt., **38** (1999) 5283-5289.
- 55) 木下修一, 吉岡伸也: “昆虫, 特にモルフォチョウの構造色”, 繊維学会誌, **59** (2003) 35-39.
- 56) 木下修一, 吉岡伸也, 藤井康裕: “自然界の構造色の仕組み”, 色材, **75** (2002) 493-499.
- 57) D. Koon and A. Crawford: “Insect thin film, as sun blocks, not solar collectors,” Appl. Opt., **39** (2000) 2496-2498.
- 58) 渡邊順次: “コレステリック液晶が創る美しい昆虫の翅の色”, 繊維学会誌, **59** (2003) 40-42.
- 59) 大桃定洋: “タマムシを考える”, Otoshibumi, No. 21 (2001) 1-22.
- 60) P. Vukusic, R. Sambles, C. Lawrence and G. Wakely: “Sculpted-multilayer optical effects in two species of *Papilio* butterfly,” Appl. Opt., **40** (2001) 1116-1125.
- 61) 古知 新: “オオセンチコガネの金属光沢の機能”, 昆虫と自然, **36** (2001) 4-7.
- 62) 田村一二三: “玉虫色のひみつ”, 金属, 9月号 (1981) 40-45.
- 63) 田畑 洋, 高橋秀和, 熊沢金也: “モルフォスコウスキー蝶の発色原理に基づく干渉発色繊維の断面構造設計の検討”, 光学, **31** (2002) 502-506.
- 64) J. Brink, N. Berg and A. Botha: “Iridescent colors on seashells; An optical and structural investigation of *Hercian pruinosa*,” Appl. Opt., **41** (2002) 717-727.
- 65) C. Lawrence, P. Vukusic and R. Sambles: “Grazing-incidence iridescence from a butterfly wings,” Appl. Opt., **41** (2002) 437-441.
- 66) R. McPhedran, N. Nicoroviu, D. McKenzie, G. Rouse, M. Large, L. Botten, A. Parker, V. Walch, V. Vardeny and M. Wohlgenannt: “Structural colors through photonics crystals,” *6th International Conference on the Inhomogeneous Media* (Snowbird, US, 2002).
- 67) 立花太郎: シャボン玉 (中央公論社, 1975) 口絵写真.
- 68) 小倉繁太郎監著: 生産現場のための光学薄膜の設計・製作・評価技術 (技術情報協会, 2001).
- 69) 小倉繁太郎: “真珠の多層膜構造—電子顕微鏡と粗さ測定機による真珠の表面・断面観察”, 神戸芸術工科大学紀要, **95** (1996) 8-13.
- 70) 小松 博, 鈴木千代子, 小倉繁太郎: “淡色系真珠に現れる光の干渉現象とその測定”, 宝石学会誌, **23** (2002) 1-4.
- 71) 小倉繁太郎, 大藪雅史, 初村まりも, 徳本真弓, 小松 博, 金芝影: “構造色とその応用”, 神戸芸術工科大学紀要, **03** (2004) 142-161.
- 72) 小倉繁太郎: “自然界に存在する格子および多層膜構造による干渉色—真珠・蝶・蛾の鱗粉, および魚の鱗の顕微鏡観察”, 応用物理, **66** (1997) 1330-1334.
- 73) 大藪雅史, 小倉繁太郎: “構造色解析 (1)—2次元測色システムによる甲虫翅鞘測色—”, 第2回構造色シンポジウム予稿集 (2001) pp. 29-34.
- 74) 小倉繁太郎, 大藪雅史, 中澤純郎: “Rainbow Ammonite の発色メカニズム”, Optics Japan '02 予稿集 (2002) pp. 290-291.

(2003年10月27日受理)