

## 「色の科学」を楽しもう

### Let's enjoy science of color

田所 利康

Toshiyasu Tadokoro

有限会社テクノ・シナジー

Techno Synergy, Inc.

193-0832 東京都八王子市散田町 2-46-16

2-46-16 Sanda-cho, Hachioji-shi, Tokyo 193-0832

E-mail: tado@techno-synergy.co.jp

**あらまし** 物質が持つ固有の色は、その多くが、選択的な光吸収という現象によって生み出されている。さらに、物質表面の微細構造が構造色と呼ばれる鮮やかな色を作り出すこともある。本講では、物質の色の発現メカニズムについて考察していく。

**Abstract** The characteristic colors of most materials have their origin in the phenomenon of selective optical absorption. Besides, micro-structured surfaces may produce vivid colors, called structural color. In this presentation, the coloring mechanism of materials are discussed.

#### 1. はじめに

物質は、その物質固有の色を持つ。これは、物質が特定の波長を吸収し、物質からの反射光または透過光が特定の波長成分を多く含むことによって生じる色である。身の周りで見られる様々なものの色は、この選択的な光吸収によるものである。

一方、固有の色を持たない透明な物質でも、光の波長程度の微細な周期構造があれば、構造色と呼ばれる鮮やかな発色をする。例えば、CD-R などの光ディスクを照明にかざすと虹色に光るのは、ディスクに光の波長程度の間隔で刻まれた溝が起こす回折現象のためである。

本講では、これら 2 つの異なる発色メカニズムについて考察していく<sup>1)</sup>。

#### 2. 吸収と乱反射が決めるモノの色合い

##### 2-1. 白い紙と鏡はどこが違うのか

物質表面の反射状態は、吸収と同様、ものの色合いを決める重要な要素である。図 1(a) のテーブルの上には、白い紙が置かれている。光と影のようすから、紙が平面であることが分かる。白い紙が、自然光の下で白く見えるのは、紙が全ての波長の光を偏ることなく反射しているからである。

一方、図 1(b) の鏡は、全ての波長の光を反射しているにも関わらず、紙のように白く見えることはなく、背後にあるものの姿を映す。きれいに磨き上げられた鏡では、指紋などで表面が汚れていな



図 1 乱反射と正反射の見え方の違い

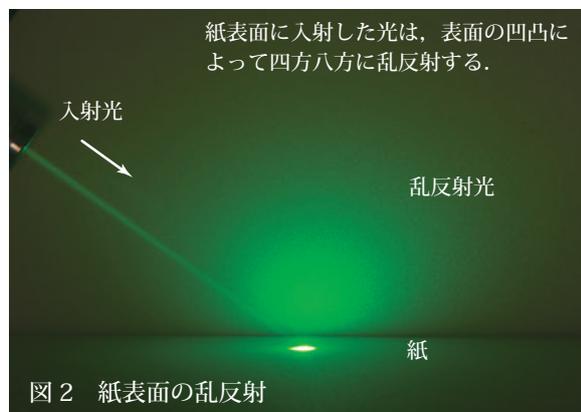
い限り，鏡自体がどこにあるのか分からない。

両者の反射で異なる点は，紙の表面では光が乱反射するのに対して，鏡の表面では正反射（鏡面反射）することである。正反射は入射角と等しい反射角方向に出射する通常の反射だが，乱反射は反射角以外の方向にも広がって出射する。ものの表面が「見える」ためには，鏡のような正反射ではなく，表面で乱反射することが必要なのである。

## 2-2. 乱反射と吸収が色合いを決める

乱反射を起こす物質の表面を観察すると，多かれ少なかれ，磨りガラスのような凸凹が見られる。そのため，一定角度で入射された光でも，微視的に見れば，色々な角度を持つ小さな平面の集合体に光が入射されたことになり，微小平面ごとに出射方向が変わって，全体として乱反射が生じる。逆に，一つの出射角方向から乱反射表面を見ると，色々な方向から入射した光が重なって目に入ってくるため，鏡のように像が映ることはなく，構造のない単なる色が見えるのである。

乱反射で出射方向が広がる程度は，表面の凹凸状態によって様々であり，入射角に等しい反射角周辺に強く出射する場合もあれば，図2に示す紙



の乱反射のように，入射角によらず空間の全方向に出射する場合もある。

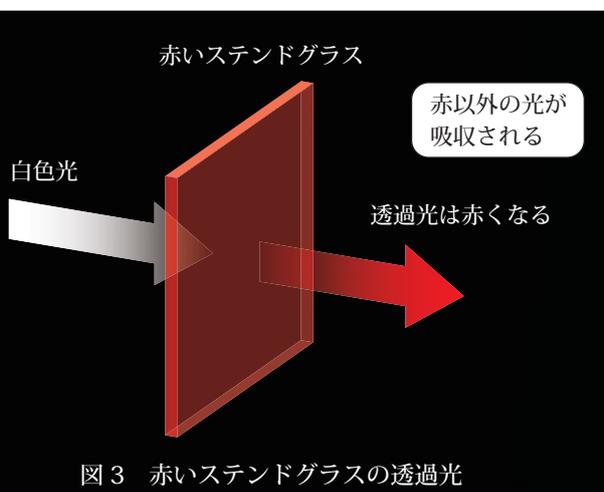
白紙のように，乱反射するものが光を吸収しなければ，その表面は白く見える。しかし，赤を吸収するものは，緑と青を乱反射してシアンに見え，緑を吸収するものはマゼンタに，青を吸収するものはイエローに見える。これらの色が混ざり合うことで，多くの色彩が作り出される。吸収が作り出した色は，乱反射によってあらゆる方向に広がる。そのため，吸収によって作り出された物質固有の色は，見る方向が変わっても，色が変わることはない。

色鮮やかなステンドグラスの色彩も，光の吸収によって作られる。赤いステンドグラスに白色光を入射すると，図3のように，当然，赤い光が出てくる。これは，光がステンドグラスを透過する間に赤以外の光が吸収され，生き残った赤い光だけが眼に届くためである。

## 3. 三原色をスペクトルで考える

### 3-1. 「白」は全ての色を含むわけではない

ディスプレイで実際に使われる光の三原色，すなわち赤 (R)，緑 (G)，青 (B) は，スペクトル純色ではなく，ある波長帯の光が混ざった混色である。図4は，写真用三原色フィルターを通したスポットライトの色と透過スペクトルである。R，G，Bといっても，それぞれ波長幅 100nm 程度の分布を持っている。例えば，RとGの重ね合わせである黄色のスペクトルは，RとGのスペクトルを足したものである。足し算により得られたスペクトルは凸凹しているが，人間の目には黄色に見える。R，G，Bを足し合わせて得られる白は，全ての色を均等に含む印象があるが，R，G，Bの3つの山の強度バランスが取れていれば，人間の目には白く見える。



### 3-2. 三原色で全ての色が作り出せる訳ではない

図5に示すように、色度図上の2つの色を結んだ直線上の色は、2つの色の加算混合で作ることができる。3つ目の色を加えて、三角形を作るとしよう。ある頂点の色と、その頂点に対する辺上の色を混ぜれば、三角形の内側の色が作り出せる。3つの色で作られた三角形の内側にある全ての色は、3つの色の加算混合で作出すことができるのである。

さて、色度図で人間に見ることができる色は、釣り鐘状の領域内である。色度図内のどのような3点を選んで三角形を作ったとしても、その三角形では再現できない外側の色が存在することになる。実は、加算混合でも減算混合でも、三原色で全ての色が作り出せるというのは近似的な話であり、光の三原色である赤、緑、青は、大きな面積の三角形を作り出せる三つの色でしかない。三角形の外側の色も再現しようとした場合、3より多くの原色を混ぜ合わせる必要がある。それにも係わらず、テレビや印刷が三原色で事足りているのは、世の中に存在する多くの色は純度が低く、色の感じ方に主観的な要素があるためである。

ディスプレイの三原色には、いくつかの規格がある。規格によって三原色の色座標が違っており、再現できる色の範囲が異なる。しかし、いずれの規格でも、分光器を通して見られる鮮やかなスペクトル純色は、再現することができない。

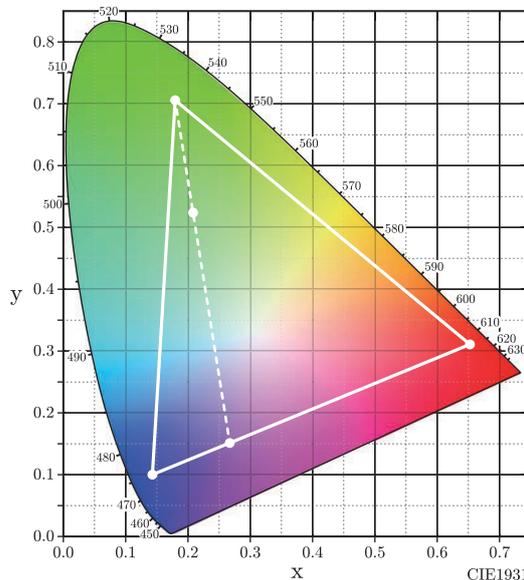
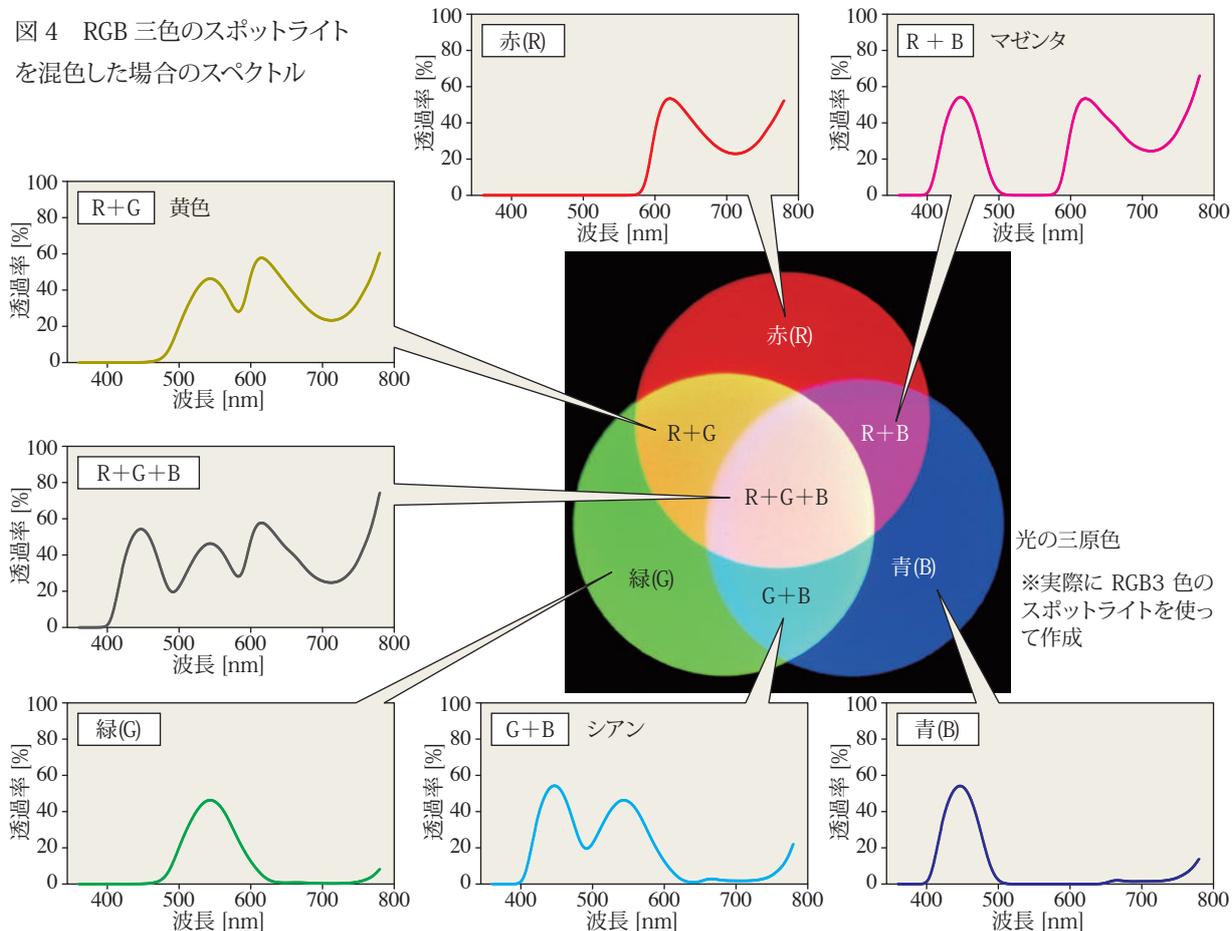


図5 三角形内の全色は三色の加算混合で作られる

図4 RGB三色のスポットライトを混色した場合のスペクトル



### 3-3. 印刷の色再現

減算混合の三原色は，シアン：白から赤を引いたもの，マゼンタ：白から緑を引いたもの，イエロー：白から青を引いたものである．例えば，シアンとイエローを重ねると，白から赤と青を引くことになり緑が残る．その時得られる緑のスペクトルは，シアンとイエローのスペクトルを掛け合わせたものである．スペクトルの掛け算になる理由については，サングラスを重ねて減光した場合を想像すれば理解しやすい．ある波長の透過光量を半分に減らすサングラスがあるとしよう．2つ重ねた場合，1つめで透過光量は 50% に減光され，2つめでさらにその 50% になる．つまり，最終的な透過光量は，透過率同士の掛け算，すなわち  $0.5 \times 0.5 = 0.25$  になるのである．

三原色を重ね合わせると，理想的には，シアン，マゼンタ，イエローのスペクトルが掛け合わされて黒になるはずである．実際には，完全な黒にすることは難しい．例えば図 6 では，波長 600nm 付近の光が消え残ってしまい，赤みがかった黒になっている．印刷では，こうした状態を避けるために，シアン (C)，マゼンタ (M)，イエロー (Y) の三原色に加えて，黒 (K) のインクが併用されている．

### 4. 構造色

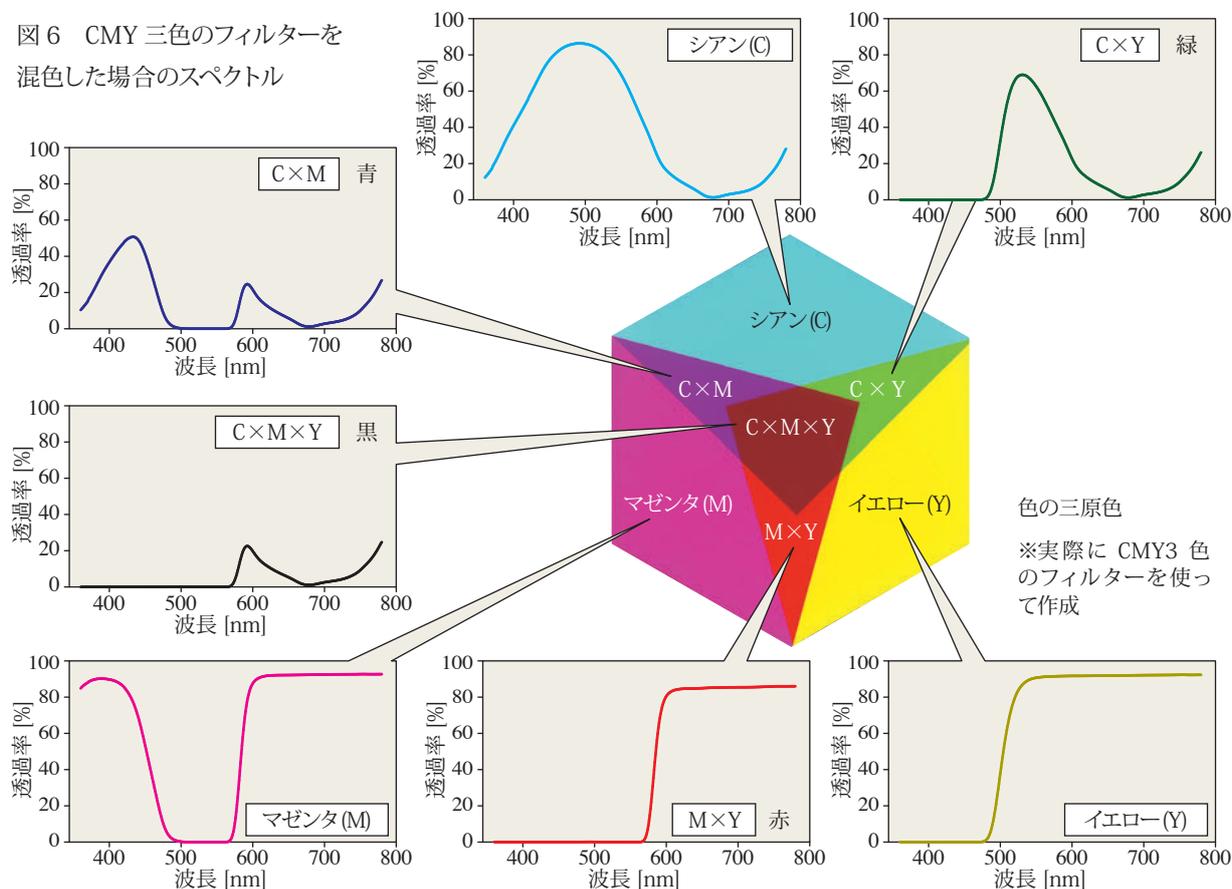
#### 4-1. 微細構造が作る鮮やかな色

CD や DVD を光にかざすと虹色に輝く．CD などの光ディスクでは，音や画像を記録するピットが，光の波長程度の間隔で，ディスクの半径方向に規則正しく並んでいる．個々のピットで回折された光が足し合わされて，強め合う条件に合った波長の光が輝く色を作る．このような光の波長程度の微細な周期構造が作り出す色を構造色と呼ぶ．

構造色は，CD などの光ディスクや回折格子のような平面的な周期構造だけではなく，図 7 のように，薄膜や多層膜構造，三次元的な周期構造などによっても引き起こされる．構造色は，繰り返しの構造の周期間隔によって光の強め合う方向が決まるため，見る角度によって色が変わる．CD，DVD，Blu-ray (周期間隔は，それぞれ  $1.6 \mu\text{m}$ ， $0.74 \mu\text{m}$ ， $0.32 \mu\text{m}$ ) を見比べてみよう．周期間隔が狭いディスクほど，構造色が大きな角度で出射されることを確認できるであろう．

ここでは，いくつかの代表的な構造色の例を紹介していくことにする．

図 6 CMY 三色のフィルターを混色した場合のスペクトル



### 4-2. 回折格子によるスペクトル分解

回折格子は、波長に近い間隔のストライプ状の繰り返し構造を持つ。格子間隔が一定の場合、図8(a)～(c)で明らかのように、波長によって決まった角度に光を回折する。回折する角度、すなわち回折角を決めるルールはシンプルで、図9のように、繰り返し構造の隣り合う光路の光路差が波長の整数倍の時に位相が揃って強め合う。回折角は次式で表される<sup>2)</sup>。

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (1)$$

m 波長分の光路差で回折する光を m 次回折光と呼ぶ。1 次回折光が最も強く、高次回折光ほど弱くなる。

回折格子の代表的な応用は、白色光をスペクトルに分解して単色を取り出す分光器である。分光器には、一般的に反射型回折格子が使用される。

### 4-3. スペクトルを操る誘電体多層膜技術

高屈折率の誘電体膜と低屈折率の誘電体膜を交互に積層した誘電体多層膜ミラーは、多層膜間の多重干渉を制御することで、所望の波長帯だけをほぼ 100% 反射することができるミラーである。図9の層構造で作製された誘電体多層膜ミラーの場合、700 nm 付近の赤い光をほぼ完全に反射するため、透過光は反射光の補色である青緑色になる。

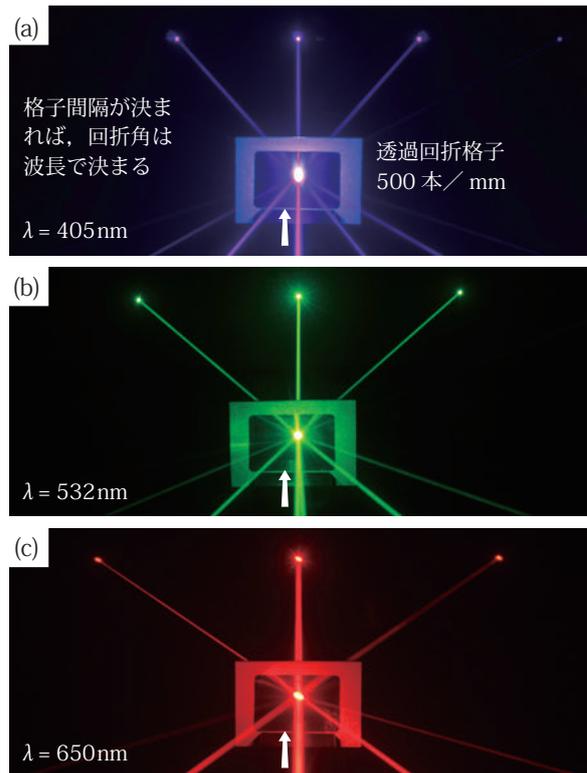


図8 回折角は波長で決まる

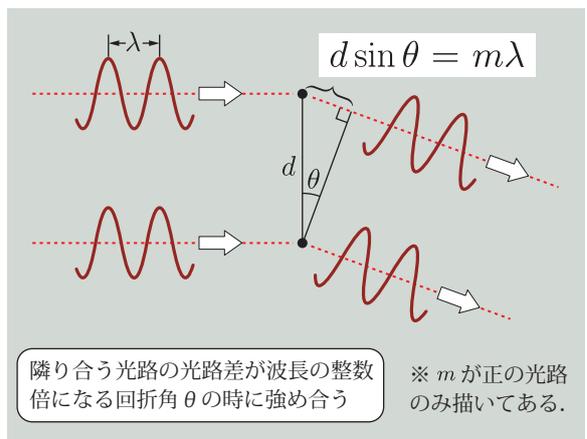


図9 透過回折格子で回折光が強め合う条件

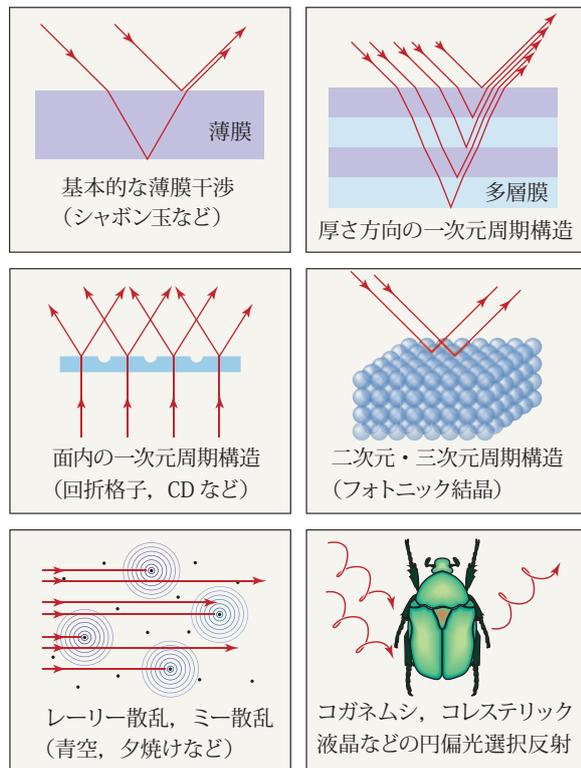


図7 構造色を発現する周期構造

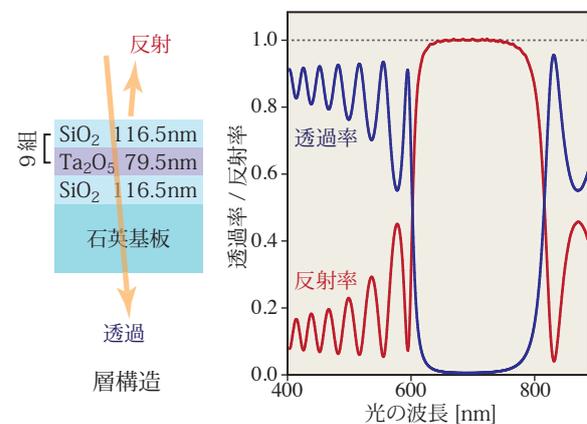


図10 誘電体多層膜ミラーの透過率/反射率スペクトル

る。誘電体多層膜技術を用いれば，ミラー以外にも，ある波長だけ透過するバンドパスフィルター，特定波長を反射 / 別の特定波長を透過するダイクロミックミラーなどを作ることができる。

## 5. 自然界に見られる構造色

### 5-1. モルフォチョウの輝く青色

生物の体色は，多種多様である。生物の色は，保護色，威嚇色，色による同種の判別など，生き抜くために重要な場面で機能している場合が多い。生物の色には，色素吸収による着色と，微細構造に起因する構造色がある。構造色は，様々な生物で見ることができる。

構造色の代表例がモルフォチョウである（図11(a)）。モルフォチョウの光沢のある青い色は，鱗粉に刻まれた微細構造によって作り出されている。鱗粉を電子顕微鏡で拡大すると，図11(b)のような断面が柵状の繰り返し構造が見られる。図11(c)のように，鱗粉に入射した光が，間隔約200nmの繰り返し構造で反射された場合，どの隣り合う光路でも，往復の光路差が約400nmになるため，波長400nm付近だけが強め合い，輝く青色を作り出す。柵の高さや柵同士の間隔にバラツキがある複雑な構造によって，単純な干渉 / 回折では得られない深みのある色が生まれる<sup>3)</sup>。

### 5-2. 構造色を持つ生物たち

モルフォチョウの他にも，多層膜構造をしたタマムシの翅の干渉色や，微細構造を持つクジャクやカワセミの羽根が放つ発色が，構造色としてよく知られている。構造色を作り出す微細構造は様々であり，多層膜，回折格子，フォトニック結晶などの構造により発色する生物が確認されている。

構造色は，色素による発色とは異なり，化石にもその痕跡が残る。そのため，化石の中に光の波長程度の周期構造が見つければ，その古代生物が生存していた時の体色を再現することができる。中生代白亜紀まで生息していたアンモナイトの化石の中には，図11(d)のように，真珠層と呼ばれる多層構造が残っていて，殻が虹色に輝くものもある。約5億年前のカンブリア紀に生息した生物の化石の中にも，周期構造を持つものが発見されている<sup>4)</sup>。古代の海では，虹色に輝く生物たちが繁栄していたのである。

## 参考文献

- 1) 大津元一監修，田所利康・石川謙著：イラストレイテッド 光の科学，朝倉書店 (2014)。
- 2) 大津元一，田所利康：光学入門，朝倉書店 (2008)。
- 3) 木下修一：モルフォチョウの青い輝きー光と色の不思議に迫るー，化学同人 (2005)。
- 4) アンドリュー・パーカー著，渡辺政隆，今西康子訳：眼の誕生ーカンブリア紀大進化の謎を解くー，草思社 (2006)。

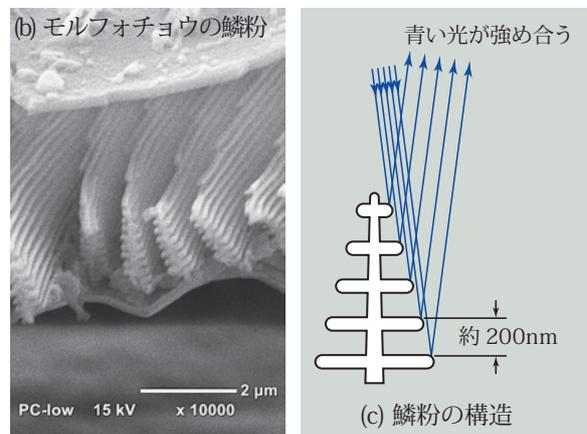


図11：構造色を持つ生物たちの例