

生物の構造的発色と色変化

阪大院生命 吉岡伸也

[緒言] タマムシやクジャクを始めとして、自然界の多くの生物が微細構造を利用して鮮やかな色を生み出している。構造色と呼ばれるこれらの色は、光の波長ほどの大きさの微細な構造体が、光の干渉、回折、散乱などの光学現象を起こすことで生み出されている。構造色の例は自然界の様々な生物種で見つけることができるが、近年の構造色研究は蝶や甲虫などの昆虫、あるいは鳥の羽根を対象として、様々な光学効果を明らかにしてきた。これらの生物では、人間で言えば髪の毛のように、細胞レベルでは死んでいる部分が微細構造を担っている。従って、構造を形成する材質は化学的に安定で、長期間にわたって発色を維持することが可能であるという長所がある一方で、能動的に色を変化させることはできない。ところが魚類やイカの仲間には、細胞内にある微細構造を自ら調節し、色を変化させる能力を持つ種類がいる。そのような可変な構造色は古くから知られていたが、詳しい変化機構に関する研究はあまり進んでこなかった。最近我々は、小型の熱帯魚ネオンテトラを対象に、構造色に変化するメカニズムを調べるために詳細な光学測定を行ったので、その結果を報告する。

[ネオンテトラの構造色] ネオンテトラのストライプ部分は Figure 1 に示すように、昼間は青色をしているが、夜になると（周囲の光量が減ると）紫色に変化する。紫色は環境が明るくなると数分で青色に回復し、さらに餌を食べるなどして魚が興奮すると黄緑色にまで色変化する。このストライプ部分の皮膚表面には虹色素胞と呼ばれる細胞が配列しており、ストライプの色は虹色素胞の色である。電子顕微鏡による観察結果から、一つの虹色素胞内部にはグアニンの結晶を成分とする薄い反射板が数多く積層し、多層膜構造を作っていることが知られている[1]。従って、反射板の間隔が変化することで、干渉条件を満たす波長がシフトし、ひいては色が変わると考えられてきた。しかし、板の間隔が変化する仕組みについては二つのモデルが提案されており、どちらが妥当なのかは完全には決定されていなかった。一つのモデルは浸透圧の変化により細胞が膨張するモデルで[2]、もう一つは反射板の傾きが変化することで干渉条件が変わるモデル（ブラインドモデル）である。

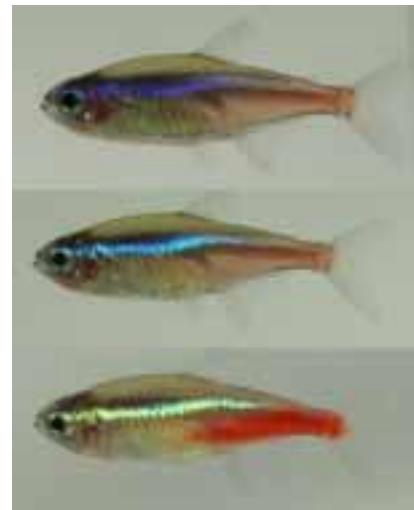


Figure 1. Color variation of the neon tetra depending on the light intensity of the surrounding environment.

Variable structural colors of animals

Shinya YOSHIOKA

(Graduate School of Frontier Biosciences, Osaka University, 1-3 Yamadaoka, Suita 565-0871, JAPAN)

Tel: +81-6-6879-4602, Fax: +81-6-6879-4602, E-mail: syoshi@fbs.osaka-u.ac.jp

Key Word: structural color / color variation / wavelength tunability / multilayer interference

Abstract: Many kinds of animals have brilliant colors that are produced by microstructures in a size comparable with the wavelength of light. These colors are called structural colors and have recently attracted a lot of scientific interests. In particular, the structural colors of some fish and cephalopods seem quite interesting, because they can change in response to the conditions of the surrounding environment. This fact clearly indicates the variability of the color-producing microstructures. A small tropical fish, the neon tetra, is one of such examples: the lateral stripe can change from blue to yellow depending on the light intensity of the surrounding. Here we report the results of our recent investigation on the variable mechanism of the structural color of the neon tetra.

[実験] ブラインドモデルでは反射小板の傾き変化を仮定するため、光が反射される方向が色変化に伴って変化することが予想される。そのため、Figure 2 に示すような顕微光学システムを構築した[4]。このシステムは三つの検出器を含み、虹色素胞の実像、反射スペクトル、そして光の反射方向（対物レンズの後側焦点面の光強度パターン）を同時に測定することが出来る。光が反射される方向を知るためには、照射の方向を定める必要がある。そのために落射照明の開口絞り位置には 100 μm のピンホールを配置した。これにより対物レンズを通過した照明光はほぼ平行光線となり、一定の角度で試料を照らすことになる。鏡面のように反射する試料を考えると、反射光は対物レンズの後側焦点面上に小さなスポットを結ぶので、そのスポット位置を観察することで反射方向を知ることが出来る。実際に回転ステージに取り付けたガラス片を試料として予備実験を行い、構築したシステムからガラス面の角度を正しく測定できることを確かめた。また、虹色素胞の色変化は、生理食塩水中のカリウムイオン濃度を变化させることで誘導できる。これは、色素胞が神経支配を受けているためである。このことを利用して、色変化が起きている間の反射スペクトルと反射方向の変化を同時測定した。

[結果] 虹色素胞が紫色の状態から色変化を誘導して測定を行った。Figure 3 はそのときの反射スペクトルで、ピーク波長が長波長側にシフトする様子がはっきりと見て取れる。またスペクトルの形状には 反射率が高いこと、 反射帯域が広いこと、 メインピークの短波長側にはいくつかの副ピークがあること、 の三つの特徴がみられる。これらの特徴は、多層膜干渉スペクトルに特有の形状で、原子間力顕微鏡を用いた決定された反射小板の厚さと、グアニン結晶の屈折率の値から、ほぼ理論的に再現できる。また、対物レンズの後側焦点面の観察から、反射された光の方向が、色変化の間におよそ 15 度変化することがわかった。このことは、反射小板の傾き角度が変化していることを強く示唆している。ブラインドモデルを仮定した解析を行ったところ、スペクトルと反射方向の変化は、矛盾なく説明できることが分った。このことから、色変化に関する他のメカニズムの寄与は無視できるほど小さいことが結論できる[4]。

- [1] Nagaishi, H.; Oshima, N. *Zool. Sci.* **1992**, *9*, 65–75.
- [2] Lythgoe, J. N.; Shand, J. *J. Exp. Biol.* **1989**, *141*, 313–325.
- [3] Nagaishi, H.; Oshima, N.; Fujii, R. *Comp. Biochem. Physiol.* **1990**, *95A*, 337–341.
- [4] Yoshioka, S.; Matsuhana, B.; Tanaka, S.; Inouye, Y.; Oshima, N.; Kinoshita, S. *J. R. Soc. Interface*, **2010**, DOI:10.1098/rsif.2010.0253.

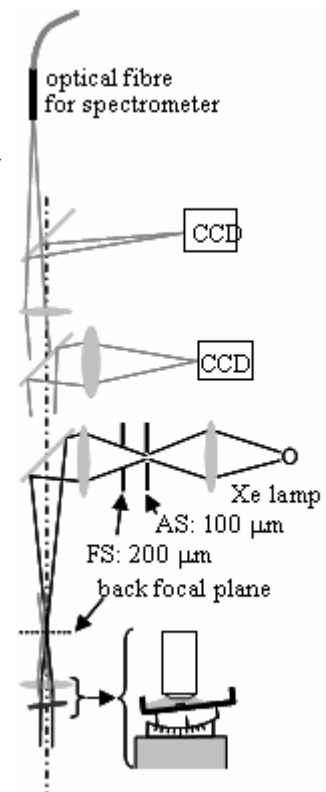


Figure 2. Optical system of a microscope that functions both as a microspectrophotometer and as a microscatterometer. The magnified images and the intensity pattern of the back focal plane of the objective are observed by two CCD cameras. The spectrum of the reflected light is measured by the fiber optic spectrometer.[4]

Figure 3.

Reflectance spectra obtained during the color variation of a single iridophore of the neon tetra. A broad band dielectric mirror is used as the reflectance standard.

