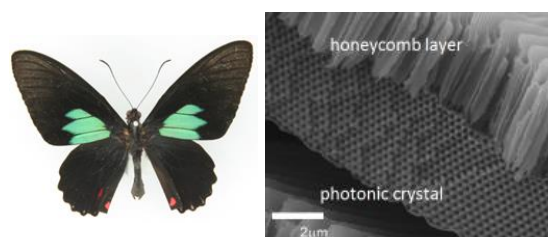


## 蝶の鱗粉のジャイロイド構造：配向特性と偏光特性

阪大院生命 ○吉岡伸也

**【緒言】** 多くの昆虫や鳥はサブミクロンサイズの微細構造を利用して鮮やかな色を生み出している。構造色と呼ばれるその色の仕組みは、例えばフォトニック結晶のように、微細構造が周期的である場合には分かりやすい。周期的な構造から反射される光は、特定の波長で強め合う干渉を起こすので、波長選択的に高い反射率が得られるからである。しかし、自然界の様々な生物を観察していくと、一見すると不思議な光学特性を持つ構造色の存在に気が付く。そのような例の一つとして、中南米に生息するマエモンジャコウアゲハ (*Parides sesostris* 図1) について紹介したい。

この蝶の前翅は黒地に緑色の斑紋を持ち、その部分の鱗粉断面を電子顕微鏡で観察すると、上側と下側では異なる構造を持つことが分かる (図1右)。上部は、蝶の鱗粉一般で、ハニカムと呼ばれるタイプの構造で、下側には構造色の起源となるフォトニック結晶が複雑な網目状に観察されている。最近、この構造がジャイロイド型の形状を持つことが明らかになった[1]。さらに、露出したフォトニック結晶の断面を詳しく観察すると、場所によって異なる表面構造が観察される。このことは、フォトニック結晶が鱗粉全体に渡って一様に広がっているのではなく、最大10ミクロン程度の大きさに分かれたドメイン構造を持つことを示している。実際、鱗粉を落射照明において直交偏光配置で顕微鏡観察すると、複数のドメインに分かれたステンドグラス状の様子が観察される (図2右)。一方、偏光板の向きを平行にして観察すると、反射強度は直交偏光配置の場合に比べてずっと強く、鱗粉はほぼ一様な緑色に観察される (図2左)。このことは次のような疑問を生じさせる。フォトニック結晶は、光の進行方向に依存して異なる周波数域でバンドギャップを持つ[2]。したがって、各ドメインがランダムな結晶配向を持つのであれば、平行偏光配置であっても鱗粉は異なる色のパッチが集まった斑模様に見えるべきではないだろうか。この疑問に答えるため、さらに詳しい構造観察を行うことにした。



**Figure 1.** *Parides sesostris*(left) and scanning electron micrograph of the cross section of the wing scale (right)

### **Gyroid-type photonic crystal in the wing scale of a butterfly: crystal orientation and polarization dependent reflection**

Shinya YOSHIOKA

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

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

Key word: structural color, photonic crystal, butterfly wing

**Abstract:** It is known that the wing scales of several butterfly species contain gyroid-type photonic crystals that produce brilliant structural colors [1]. The emerald-patched cattleheart butterfly, *Parides sesostris*, is such an example, which has green patches on the black forewings (Fig. 1). However, the photonic crystal inside the wing scale is not observed as a single crystal that spreads over the entire scale, but it is separated into many small domains with different crystal orientations. A photonic crystal generally has band gaps at different frequencies depending on the direction of light propagation [2]. Thus, it is expected that multidomain photonic crystals with different crystal orientations appear in different colors from domain to domain. However, the wing scale is actually observed to be uniformly green under an optical microscope despite the multi-domain structure. To interpret these seemingly contradicting facts, we have carefully investigated the photonic crystal structure of the wing scale using scanning and transmission electron microscopy. We discovered that the crystal orientations of different domains are not perfectly random, but there is a preferred crystal orientation that is aligned along the surface normal of the scale [3].

## [結果と考察]

フォトニック結晶の表面を直接観察するために、ガラスピペットや細い金属針を用いて、鱗粉上層のハニカム構造を取り除いた。その後、電子顕微鏡を用いて結晶表面を直接観察した結果を図3に示す。複雑な網目構造が観察されているが、網の目に沿って線を引く簡単な解析を行うと、線の向きの違いからドメイン境界を容易に見出すことができる(図3の点線)。しかし、異なるドメインは、面内の向きは異なるが、同じ表面構造を持っている。すなわち、複数のドメインに分かれたフォトニック結晶は、完全にランダムな配向を持つのではなく、鱗粉表面には同じ結晶配向が向いているのである[3]。このことは

鱗粉全体が同じ色に見えることを直接的に説明する。観察された表面構造がどの結晶方位に対応するのかを調べるために、コンピューターモデリングや3Dプリンタを用いてジャイロイド構造のモデルを作成して比較を行った。その結果{110}面の表面構造が観察された網目の形状と一致することが分かった。この結晶面は、ジャイロイド型構造を仮定したフォトニックバンド構造の計算によると、緑色に対応する周波数でバンドギャップを持つことが報告されている[2]。一方、他の方向、例えば[100]や[111]方向では、紫外線から青色の振動数においてバンドギャップを持つことが予想されている。したがって、[110]方向が鱗粉面の法線に向いていることは、顕微鏡による観察結果と矛盾しない。

面内の向きが各ドメインで異なっているとすれば、直交偏光配置で観察されたステンドグラス状の模様は、入射偏光の結晶配向に対する違いで説明できるはずである。このことを確かめるために、厳密波結合解析法を用いた理論計算を行った。[110]方向から光を入射し、直交偏光配置での反射率を計算した。その結果、入射偏光に依存して大きく反射率は変化し、ステンドグラス状の模様を矛盾なく説明することが分かった。

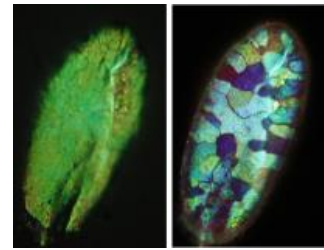
マエモンジャコウアゲハの構造色はジャイロイド型のフォトニック結晶で生み出されている。しかし、鱗粉の緑色を生み出す仕組みは意外に複雑である。フォトニック結晶は鱗粉全体に渡って単結晶ではなく、複数の結晶ドメインに分かれている。その一方で、法線方向の結晶配向をそろえることで、一様な緑色を確保し、かつ、上では述べなかったがハニカム構造によって、反射の指向性を減らす工夫を行っている。この蝶から学ぶバイオメティクス研究のヒントには、(1) 形成過程において結晶配向はそろえることができること(その仕組みは現段階では分からないが)、(2) 仮に出来上がったフォトニック結晶を回転することができれば色を大きく変えられる、(3) 複数層を用意することで反射の指向性を変えることができる、などが挙げられるだろう。

**[謝辞]** 本研究の一部は文部科学省科学研究費(No. 24120004, No. 26400432)により実施された。

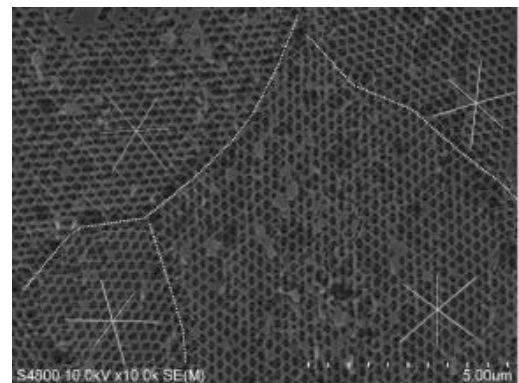
[1] K. Michielsen and D. G. Stavenga, *J. R. Soc. Interface*, 2008, 5, 85-94.

[2] L. Poladian et al., *J. R. S. Interface*, 2009, 6, S233-S242.

[3] S. Yoshioka et al., *J. R. Soc. Interface*, 2014, 11, 20131029.



**Figure 2.** Wing scale observed under a parallel (left) and a crossed (right) polarizer and analyzer.



**Figure 3** Scanning electron micrograph of the surface of the photonic crystal domains.