

輝く色を生み出す昆虫のミクロな網目構造

東京理科大学 創域理工学部 先端物理学科 教授 | 吉岡 伸也
 東京理科大学 創域理工学部 先端物理学科 助教 | 大貫 良輔

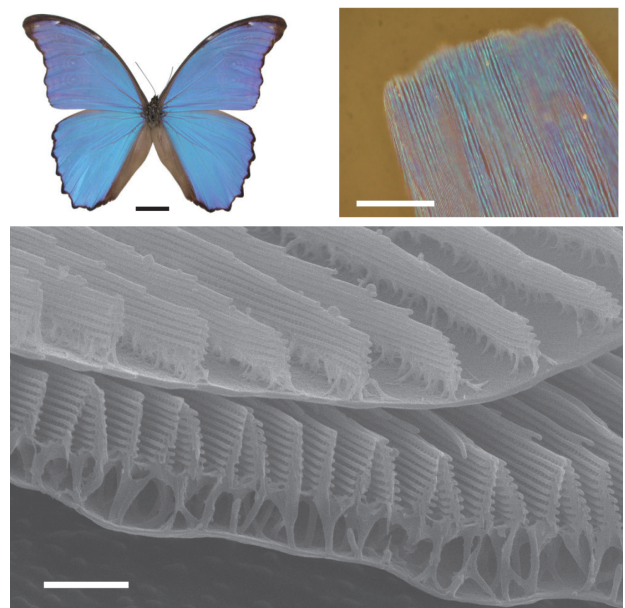
1. チョウの鱗粉の構造色

子供のときにチョウを捕まえたことのある人は多いのではないのでしょうか。翅（はね）を指ではさんで持つと、鱗粉と呼ばれる粉が指に残ります。鱗粉は翅の上に並んだ薄くて小さな板のようなものです。しかし、その表面にはミクロな構造が存在し、水をはじいて翅が濡れないようにする働きや、光を強く反射して発色するなどマルチな機能を持っています。本稿ではチョウの鱗粉が持つミクロな網目構造と鮮やかな色に関する研究例を紹介したいと思います。

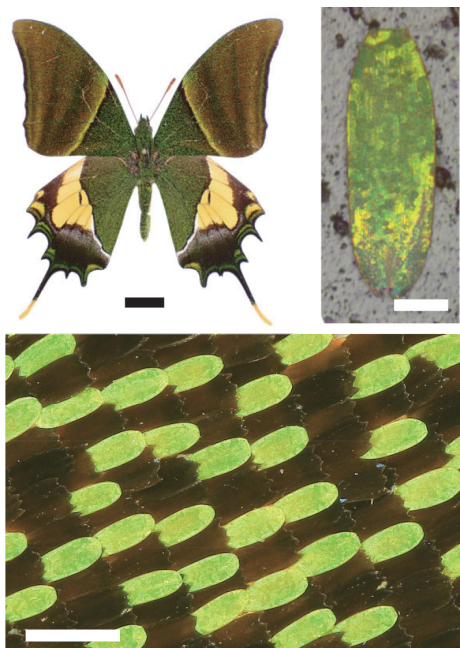
熱帯地方に生息する昆虫や鳥など、自然界には鮮やかな色模様をもつ生物が数多く存在しています。これらの色模様は単なる装飾ではなく、仲間と同じ種類であることを伝えたり、捕食者に対しては自分が毒を持っていることを知らせたりする大切な役割があります。このような色模様を生み出す物理的な仕組みには、大きく分けて二つ方法があります。一つは染料などに含まれる色素による色で、色素分子が特定の波長の光を吸収することで色がつきます。例えば、かき氷に青いシロップをかけると、無数にある氷の粒で光が乱反射されるうちに色素分子が赤や緑の光を吸収し、残った青色の光が観察者の眼に届くことで色が見えます。二つ目の着色方法がこの記事で話題にする構造色と呼ばれる色で、色素ではなくミクロな構造が生み出す色です。構造色の代表例は中南米に生息する青色のモルフォチョウです【図1】。青く輝くチョウが空を舞う様子は、ジャングルの濃い緑を背景にすると際立って見えます。その姿を現地で見たときには、宝石のようだと言われるのにも納得がきました。もちろん、標本になった後でもモルフォチョウの翅は同じように輝いていて、種類によっては翅の表面があたかも濡れているようなツヤを感じることができます。モルフォチョウの翅の色は青い色素によって生み出されるわけではなく、鱗粉の内部にあるミクロな構造がひきおこ

す光学現象によって生み出される構造色です。

鮮やかな色を持つ昆虫は古くから科学者を惹きつけ、多くの研究が行われてきました。20世紀初頭には昆虫や鳥の羽根を対象として光学顕微鏡を用いた観察結果が報告されています。その後、電子顕微鏡が開発されると、生物が持つ微細な構造が次々と明らかになりました。【図1】にはモルフォチョウの鱗粉が持つ微細構造の電子顕微鏡写真を示しました。二枚に重なった鱗粉の断面が写っており、どちらの鱗粉の上にも筋のような構造が見られます。この筋はリッチと呼ばれるおり、その側面には細かな凹凸が存在しています。実はこの凹凸が青色を生み出す原因となっています。【図1】の右上は鱗粉の先端を拡大撮影した写真です。筋状のリッチに対応して青色の筋が何本も見えます。リッチの側面にある凹凸部分が等間隔に並んでいる構造モデルを考えると、光の干渉と呼ばれる現象によって青色の反射を説明することができます。しかし、反



【図1】モルフォチョウの一種 (*Morpho didius*, 黒線 1 cm)。右上は鱗粉の先端の顕微鏡写真 (白線 20 μm)。下は鱗粉断面の走査型電子顕微鏡写真 (白線 2 μm)。重なった二種類の鱗粉の断面が写っている。筋状の構造 (リッチ) の側面には細かな凹凸の構造が見られる。

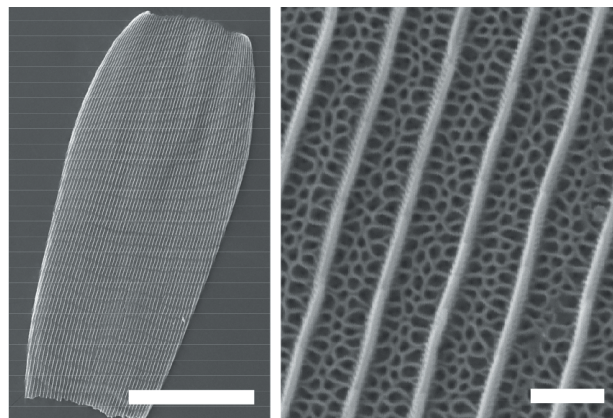


【図2】 テングアゲハ (左上, 黒線 1 cm) とその鱗粉の配列 (下, 白線 0.2 mm). 右上は一枚の鱗粉の拡大写真 (白線 50 μm).

射光の角度依存性や偏光特性, モルフォチョウの種類による光学特性の違いなどを含めると, 完全には説明がついていない特徴が多く残されています. 生物が発色に利用するのは, 科学者が解析しやすい簡単な構造ばかりではありません. 複雑で階層的な構造が示す光学現象, そして, その構造が形成される仕組みには多くの謎が残されており, 現在でも研究が続けられているのです. 【図2】に示したアゲハチョウの一種, テングアゲハもそのような対象の一つです. 私たちの研究室では, 最近このチョウの微細構造と色についての研究を行いました. その成果を紹介しつつ, 最後に構造色の応用を目指した発色材料について簡単に触れたいと思います.

2. 鱗粉内部のミクロな構造

テングアゲハはインド北部の森林地帯に分布するチョウです. 日本蝶類学会の初代会長を務められた五十嵐邁氏が率いる調査団が現地で精力的な研究を行ったことでも知られており, チョウの愛好家にはちょっと特別な存在です. 後翅の中央には黄色い領域があり, その内側には緑色の小さな点が見えます. この点のように写っているのが一枚の鱗粉です. 【図2】の下に光学顕微鏡で撮影した翅の一部分の拡大写真を載せました. びっしりと並んだ黒い鱗粉の上にまばらに緑色の鱗粉が存在していることがわかります. 黄色の領域には黄色の鱗粉が配列しており, チョウの色模様は鱗

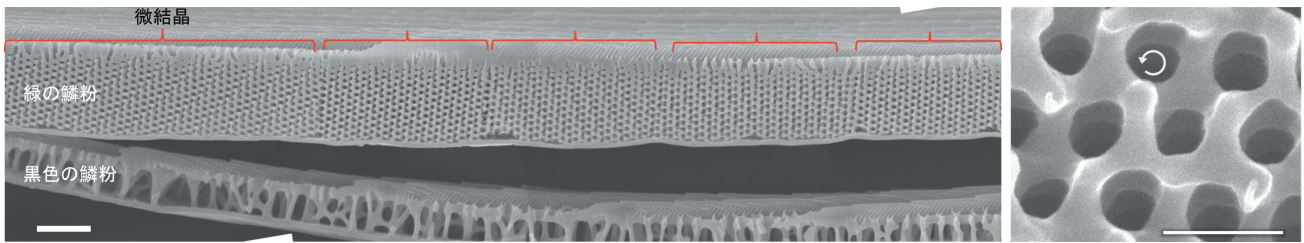


【図3】 鱗粉表面の電子顕微鏡写真. 白線は左 50 μm, 右 2 μm

粉を単位としてモザイクのように作られています. 今回の研究で注目したのは, 輝き強い緑色の鱗粉です. 【図2】の右上に緑色の鱗粉の拡大写真を載せました. よく見ると一枚の中でも色は一様ではなく, 明るく黄色に写っている部分や少し暗い緑色の領域があり, まだら模様になっています.

色を生み出すミクロな構造は光の波長よりも小さなサイズなので, 分解能が高い電子顕微鏡を使って観察する必要があります. まずは鱗粉表面を観察すると, 【図3】に示すように筋状の構造が見つかります. モルフォチョウの鱗粉にもあったリッチと呼ばれる構造で, この構造はチョウ一般の鱗粉に存在しています. モルフォチョウの場合には, リッチ側面の凹凸構造が青色を生み出す直接の原因となっていました. テングアゲハの鱗粉では, 筋状に色が見えるわけではなく, 色をつける構造は別なところにあるはずで, そこで, リッチの間を詳しく観察すると深い部分には網目状の構造がみえています. その構造を観察するため, イオンビームを用いて鱗粉の長い方向に沿った断面を作り出し, 電子顕微鏡で観察したのが【図4】です. 鱗粉は厚さが数 μm, 長さが 100 μm 程度の薄くて細長い形状をしているため, 画像は横に細長くなっています (画像は左右にまだまだ続いていて, 興味のある方は文献1)のウェブサイトにある動画を見てください). 薄い鱗粉の中には緻密で周期的な網目構造がびっしりと詰まっていることがわかります. 繰り返しの周期はおよそ 300 nm 程度で, 可視光線の波長よりも少し短い程度です. 実はこの網目構造が鮮やかな緑色を生み出しています. 光の波長程度のサイズで周期的な構造はフォトニック結晶と呼ばれており, 人工的にそのような構造を作り出し光デバイスへ応用する研究が進められています.

【図4】の網目構造を詳しく観察すると, ところど



【図4】 鱗粉断面の電子顕微鏡写真。鱗粉の長い方向に沿った断面。右は網目の拡大写真。白線は左 2 μm，右 0.5 μm

ここで表面構造が変化していることがわかります。鱗粉にあるフォトニック結晶は、一つの連続した網目（結晶）が鱗粉全体に渡って広がっているのではなく、複数の小さな微結晶が集まって多結晶として鱗粉を構成しているのです。翅の上には二種類の鱗粉が重なっているため、【図4】にも二枚の鱗粉が写っています。下側にあるのは黒い鱗粉ですが、この鱗粉には上側の鱗粉にあるような緻密な網目構造は見られません。しかし、黒い鱗粉にはメラニン色素が含まれており、下地を黒くすることによって、上にある緑色の鱗粉が生み出す色を鮮やかに見せる働きがあります。

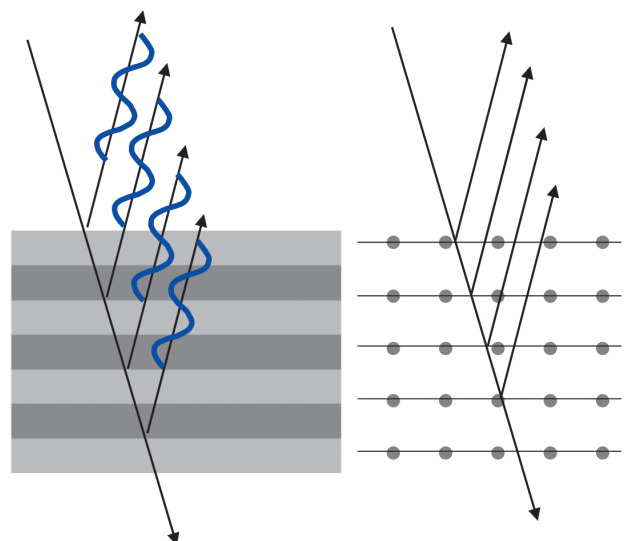
著者の一人（吉岡）が構造色の研究を始めたのは20年以上も前ですが、その頃にはハサミやカミソリを使って翅を切断していました。できるだけ鋭利な新品のハサミを使っても、断面の大部分は乱れてしまい、広い領域にわたって微細構造を評価することはできませんでした。【図4】に示した断面はアルゴンガスのイオンビームを用いて切削しています。そのため、切断面はとても平滑で、構造を詳しく解析できるようになりました。【図4】の右側は網目構造の拡大図です。網目構造のある方向から観察すると、穴にそってねじれたらせんになっている特徴があります。これについては第5節で詳しく紹介します。

3. 網目構造による発色現象

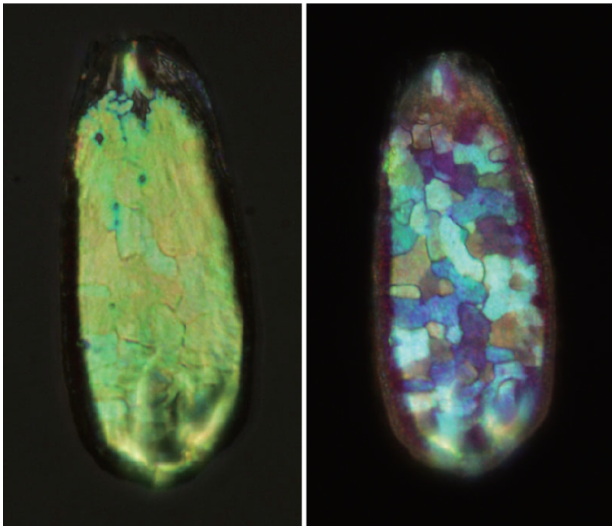
複雑な網目構造はどのようにして緑色を生み出すのでしょうか。それには光の干渉と呼ばれる現象が関係します。構造色を生み出す構造の代表例として、シャボン玉のような薄い膜が複数重なった構造があげられます（【図5】左）。このような層状構造では多層膜干渉と呼ばれる現象が起きます。光は屈折率が異なる境界面で反射されますが、層構造の内部にある複数の境界面で光は幾度となく反射され、互いに重なりあって観察者の眼に届きます。そのとき、光の波の山と山が重なって強め合ったり、山と谷が重なって弱めあったりするのが光の干渉と呼ばれる現象です。周期的な層

状構造（二種類の材質でできた同じ厚さの薄膜が交互に重なった場合）では、繰り返しの厚さ（正確には屈折率を掛け算した光路長）に対応する波長の光が強め合って強く反射されます。この波長選択性が特定の色を生み出す原因になります。身近な昆虫であるタマムシの玉虫色は多層膜構造を利用して生み出された構造色の代表例です。

網目構造で作られた複雑なフォトニック結晶の場合には、光を反射する境界面が明確ではありません。しかし、結晶であること、すなわち三次元空間の中で周期的であることに注目すると、X線回折におけるブラッグ回折の類推で反射の仕組みを考えることができます。ブラッグ回折においては、結晶を作る格子点の面（格子面）を考え、面の間隔に依存して強め合う波長が定まります（【図5】右）。フォトニック結晶においても繰り返しの構造を一つの格子点として考え、それらを線をつないだ格子面を考えると、その間隔は光の波長のサイズになります。すなわち、可視光の波長領域でブラッグ回折が起きたのが鱗粉の色の起源であると考えられます。回折を起こすX線の波長は結晶へ入射する角度によって変化します。同じように、フォトニック結晶が傾くと反射する光の波長が変



【図5】 多層膜干渉（左）とブラッグ回折（右）の模式図



【図6】 マエモンジャコウアゲハの鱗粉。照明光と観察光の偏光を平行にして観察したのが左、直交させた場合が右。

化します。【図2】右上に示した鱗粉一枚の写真で、明るく黄色に見える部分では、格子面が鱗粉の表面に平行になっており、光を強く反射させています。一方、やや暗く緑色に写っている部分は格子面が傾いていることが明るさの違いの原因であることがわかっています。

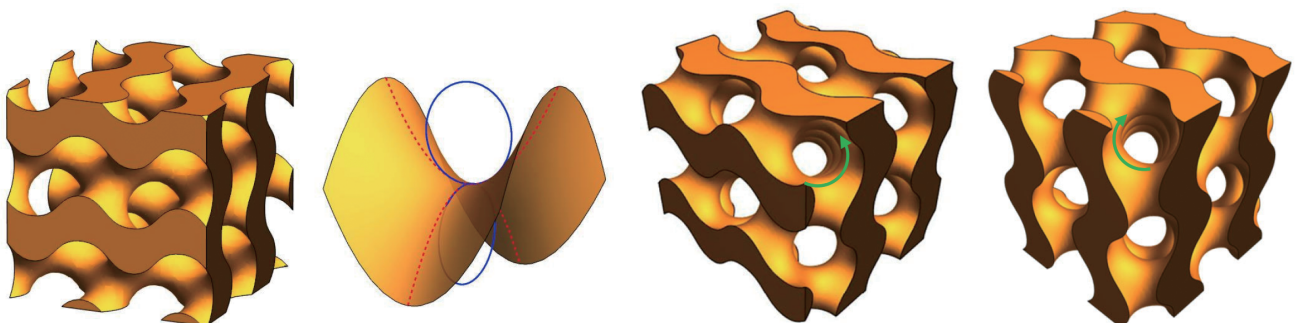
複雑な形状を持つフォトニック結晶は、光の偏光に強く依存した反射特性を持つ場合があります。【図6】にステンドグラスのような模様を持つチョウの鱗粉を示しました。マエモンジャコウアゲハと呼ばれるチョウの鱗粉で、テングアゲハと同じタイプの網目構造を持っています。【図6】の写真は偏光板を利用して撮影しており、左は照明光と観察光の偏光が平行になるように配置して撮影した写真で、右は偏光が直交する配置で撮影したものです。平行配置の場合には鱗粉は明るい緑色ですが、直交させた場合にはステンドグラスのような模様が見えるのです。鱗粉が光を反射するとき、もしも偏光方向を回転させる性質がなければ、直交配置では鱗粉は真っ暗に写るだけです。実際には、網目構造が特定の波長においてだけ偏光を回転させて

反射するので、色がついて見えます。また、照明光の偏光方向に対して、多結晶を構成するそれぞれの結晶の向きが異なっているため、ステンドグラス状の色模様が生み出されます。

4. 網目構造は極小曲面に基づく

鱗粉の中にある複雑な網目構造は、そもそもどんな構造なのでしょう。三次元的な構造を正確に同定することは簡単ではなく、間違った構造が提案されたこともあります。現在では、世界中の研究者が複数の実験方法を駆使した研究を行い、ジャイロイド型と呼ばれる構造であることがわかっています。【図7】左にモデル図を示しましたが、一見してとても複雑な網目構造です。しかし、一つの立方体に収まる網目を繰り返しの単位として、それが上下左右に連結した構造になっています。そのため、特定の方向から眺めると(例えば立方体の対角線の方向)、穴が網目を貫通している様子が見られます(【図7】右)。

ジャイロイド構造は「極小曲面」と呼ばれる特別な曲面に基づいて作られています。極小曲面は数学の研究対象にもなっている曲面で、曲面上のあらゆる点において平均曲率がゼロであるような曲面として定義されています。その意味は【図7】の鞍状の曲面を考えるとわかりやすいです。鞍の中央の点で曲面に接する円を考えると、円は曲面上側に見える場合と下側に見える場合があります。曲面のどちら側に見えるかに対応させて+か-の符号をつけて、半径の逆数として曲率を定義します。そして、接する円を様々な平面内で描いて、曲率の最大値と最小値の平均をとったのが平均曲率です。極小曲面が平均曲率がゼロの曲面であるということは、曲面上のあらゆる点で鞍のようになっていることを意味します。さらに、そのような極小曲面の中で、三つの方向に周期的な極小曲面は三重周期極小曲面と呼ばれています。



【図7】 左からジャイロイド型の構造モデル、鞍型の曲面、左手型のジャイロイド構造、右手型のジャイロイド構造

チョウの鱗粉の構造は、ジャイロイド曲面と呼ばれる三重周期極小曲面を利用して作られています。この曲面は三次元空間を二つの入り組んだ網目状の経路(チャンネル)に分離します。その片方に鱗粉の材料であるクチクラを充填するとチョウの鱗粉と同じつながり方をした網目を得ることができるのです。チョウの微細構造の中に数学的な曲面が隠されているのですから、なんだか不思議だな、と思いませんか。ただし、詳しく比較すると異なる部分もあります。数学的に考えられたジャイロイド曲面が分離する二つの網目は互いに等しい体積を持ちます。一方、チョウの鱗粉の場合には、クチクラの空間充填率は0.5よりも小さく、チャンネルがやや細いことを意味します。

5. ジャイロイド構造の左手型と右手型

ジャイロイド構造にはよく似た二種類があります(図7)の右側二つ)。両者はとてもよく似ていますが、立方体の対角線の方向から構造を貫通する穴を見たとき、らせんがねじれる方向が異なることで区別できます。左巻きのらせんが見えるときには左手型、右巻きのらせんが見えるときには右手型と区別されるのです。左右の手が名前になっているのは、鏡に映すことで両者が互いに移り変わることができるからです。鏡像異性体という言葉で習ったことを思い出したなら、まさにそのことです。ジャイロイド曲面で分けられた二つのチャンネルのうち、片方に材料を詰めるとジャイロイド構造になるのですが、どちらのチャンネルを詰めるかによって左手型か右手型になるかが定まります。

左手型と右手型の構造はよく似た構造なので、同じ割合で見つかるのでしょうか。実は、自然界を見渡すと二種類のねじれ方のうちの片方に偏っているようなケースがたくさん見つかります。アサガオのつるの巻き方はどれをみても一定であり、巻貝の巻き方も偏っています。これらの生物では、成長するときに巻き方が定まる仕組みがあるのに違いありません。また、生物の体内にあるアミノ酸分子にも鏡像異性体がありますが、実際に生体内に存在しているのは片方に偏っています。なぜ片方の鏡像異性体のみが利用されるのかは、自然界の謎の一つです。巻貝のサイズは数cm程度、アミノ酸は分子サイズなので0.1nmのスケールです。それではその間のサイズである300nm程度のチョウのジャイロイド構造では左手型と右手型に偏りがあるのでしょうか。そのような疑問からテングア

ゲハのジャイロイド構造がどちらの型なのかを判別する観察を行いました。一枚の鱗粉の中にはたくさんの微結晶がふくまれています。その一つ一つでジャイロイド結晶の巻き方を観察していくのです。例えば【図4】の右の写真では左手型のジャイロイドになっています。当初、左手型と右手型の両方が見つかるのではないかと予想していました。しかし、学生さんが丁寧に観察していくと、どれだけ観察をしても左手型しか見つかりません。粘り強く観察を続け合計218個のジャイロイド微結晶の巻き方を決定したのですが、そのすべてが左手型になっていることがわかり、この発見を論文として発表しました^[1]。別な種類のチョウについての先行研究では、左手型が多いことは報告されていましたが、その割合は多くとも7割程度で、テングアゲハのように完全にそろっているチョウが見つかったのは初めての例です。

6. 網目構造の作られ方

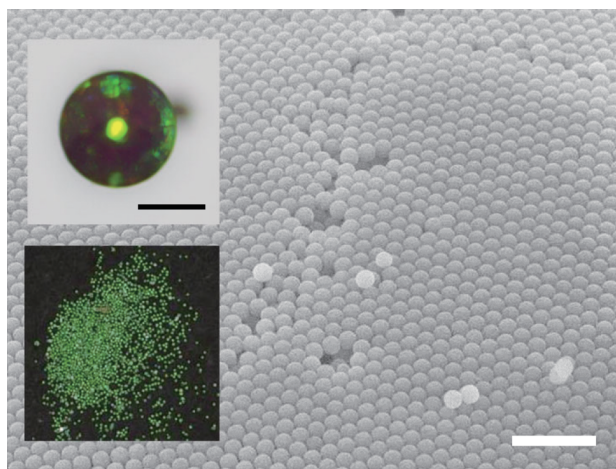
そもそも鱗粉の網目構造はどのようにして作られるのでしょうか。チョウの翅とその上にある鱗粉は、幼虫が蛹(さなぎ)になって完全変態が行われるときに作られます。この発生過程を外側から詳しく観察できると良いのですが、残念ながら、生きている蛹にダメージを与えることなく、光の波長サイズの小さな構造を観察する方法はありません。そのため、網目構造の形成過程はあまりよくわかっていないのが現状です。しかし、蛹になってから一定の時間が経過した時点で蛹を解体し、鱗粉を形成する細胞を化学的に固定して電子顕微鏡で観察するという方法で研究が行われました。その結果、鱗粉を形成する細胞の中にある、滑面小胞体と呼ばれる部分に関係していることがわかっています。滑面小胞体の膜(と細胞膜)がジャイロイド曲面のような形状に変形し、細胞外の領域に昆虫の材料であるクチクラを分泌することで網目構造が形成されていると考えられているのです。しかし、どのような仕組みで膜がジャイロイド型に変形するのか、また、左手型のジャイロイドが多く作られるのか、など、答えられていない疑問が数多く残っています。

他の昆虫では異なる極小曲面に基づいたフォトニック結晶構造が見つかっています。例えば、甲虫の仲間のゾウムシでは、ダイヤモンド曲面と呼ばれる極小曲面に基づいたフォトニック結晶構造が発見されています。ゾウムシの鱗片にもクチクラでできた網目構造が存在し、その網目はダイヤモンドの炭素原子の共有結

合をつなげたのと同じつながり方をしているのです。他にもカミキリムシの一種の中に、I-WP型と呼ばれる極小曲面に基づいたフォトニック結晶構造が発見されました。数学的には数多くの極小曲面が知られています。今後も研究が進展することによって、より多くのタイプの網目構造が生物の中で見つかっていくのではないのでしょうか。そのとき、異なる昆虫たちは、一体どのようにして、特定の極小曲面構造を選んで作るのでしょうか。疑問はとどまることなく湧き上がってきます。

7. 構造色の応用へ向けて

昆虫の持つ鮮やかな色を人工的に再現できたのなら、身の回りの物を彩るのに使えそうです。実際、生物が持つ微細構造に着想を得て、構造色材料を作り出す研究が盛んに行われています。私たちの研究室ではフォトニックボールと呼ばれる材料の研究に取り組んでいます。フォトニックボールは小さなコロイド粒子（大きさは200 nm程度）を数十 μm 程度の球の形に凝集させた材料です【図8】。この材料は比較的簡単な方法で作成することができ、球の形であるため角度による色の変化が少ない構造色材料として期待されています。機械的な強度が弱いことなど、まだまだ解決しなければならない課題はありますが、将来の実用化を見据えて研究を進めています。他にも、国内外の研究者が、クジャクの羽根を模倣した黒色の粒子を用いた発色材料やコガネムシが持つらせん構造を利用した材料など、自然界の生物が利用する構造や機能を模倣し、人工的に応用する研究を行っています。このような研



【図8】 フォトニックボールの表面の電子顕微鏡写真（白線2 μm ）左上は一つのボールの光学顕微鏡写真（黒線50 μm ）。左下は複数のボールをまいたときの発色の様子。

究はバイオミメティクス（生物模倣）と呼ばれる分野の一例で、自然に学ぶことで、安全かつ持続可能な人間社会の実現を目指しています。身近な昆虫や生物であっても、興味を持って詳しく調べているうちに、意外な発見に結びつくかもしれません。もしそれが何かの役に立つとしたら、さぞ楽しいだろうと期待しながら研究を続けています。

テングアゲハの研究は2023年度に修士課程を修了した井上雅之君が中心となって行いました。

参考文献

- 1) M. Inoue *et al.*, Scientific Reports 15, 20968 (2025).