





甲虫の微細構造観察 ~美しい構造色の起源を探る~

東京理科大学 吉岡 伸也氏, 筑波大学 微細加エプラットフォーム 末益 崇氏, 俵 妙氏, 中島 清美氏に聞く



(左)吉岡氏(中) 俵氏と末益氏 筑波大学 PF, FIB-SEM 装置の前で(右) 中島氏

文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業は,最先端研究設備の共同利用によりイノベーションの創出 を図る.これによって得られる多くの成果の中で,特にホットな成果をピックアップして紹介する本 Web ジャー ナル,NanotechJapan Bulletin 企画特集記事として今回は,東京理科大学が筑波大学の微細加工プラットフォーム (PF)を活用して,甲虫の微細構造観察した成果を取り上げる.玉虫の翅は,玉虫色に美しく輝いて見え,古来よ り玉虫厨子に代表される装飾用に珍重されてきた.この美しい色は構造色と呼ばれ,光の波長オーダーの微細構造 によって発色している.東京理科大学 理工学部物理学科 教授の吉岡 伸也(よしおか しんや)氏は,様々な生物 での構造色研究の第一人者であり,筑波大学の微細加工 PF の利用者になって,甲虫の微細構造観察に取り組んだ. 今回 Web によるリモート取材で,吉岡氏と,筑波大学微細加工 PF 側から筑波大学 数理物質系教授の末益 崇(す えます たかし)氏,同 PF の俵 妙(たわら たえ)氏,中島 清美(なかじま きよみ)氏(現,理化学研究所勤務)に, 構造色研究の動向, PF を利用した甲虫の微細構造観察,観察結果の解析をベースにした構造色の起源究明,など を伺った.先ず,末益氏から,筑波大学の微細加工 PF の概要について話を伺った.



筑波大学の微細加工 PF では,画期的な材料開発に挑む 産学官の利用者に対して,高度な技術支援とともに利用 機会を提供している [1].

図1は、PFで利用できるナノテク・半導体分野の装置 群で、リソグラフィ・成膜・エッチング関係の微細加工 装置、加工したデバイスを観察・形状評価する顕微鏡群、 電気特性や光学特性を評価する装置群,などがある.図1 左上のデバイスシミュレータは,SiデバイスやSiCパワー デバイスの製造プロセスや性能をシミュレーションする もので,学外からリモートアクセスして利用できる.

今回,甲虫の微細構造観察に利用した装置は,図1の 3段目中央のFIB-SEM(Focused Ion Beam:集束イオンビー ム,Scanning Electron Microscope:走査電子顕微鏡)装 置である(FEI 社製,Helios 600i).FIBでは,Gaイオン を電界で加速し細いイオンビームに絞り込んで試料に照 射し,試料を精密に加工できる.SEMでは電子ビームを



図1 筑波大学の微細加工 PF で利用できる装置群

試料面上で走査し, 試料表面から放出される 2 次電子を 検出することで, FIB で加工した試料断面を観察できる. 1 台の装置に FIB と SEM の両方を組み込み, 試料を装置 間で移し替えることなく, 加工と観察ができる. さらに, 筑波大学 PF の FIB-SEM 装置では, FIB 加工 (Slice) と SEM 観察 (View)を繰り返して行い (Slice & View), 得 られた複数枚の連続 SEM 画像をコンピュータで再構築す る 3 次元解析が可能である. この 3 次元構造解析機能が, 甲虫の微細構造解明に威力を発揮した.

筑波大学 PF の FIB-SEM 装置を利用してデンプン顆粒 内の空洞を観察した成果を,本 Web マガジンで過去に取 り上げた [2]. この時の利用者は浜松医科大学の針山氏で, 東京理科大学の吉岡氏は構造色の共同研究をしていた関 係があった.吉岡氏は針山氏の紹介で,筑波大学 PF を利 用することになった.甲虫の微細構造観察では,FIB-SEM 装置での経験が豊富な中島氏が PF 側技術スタッフとして 支援した.中島氏はその後理化学研究所に移籍し,現在 筑波大学 PF で FIB-SEM 装置を担当しているのは俵氏である. PF には 3 人の技術スタッフがおり, 俵氏は FIB-SEM 装置も含め他の装置も担当している.

筑波大学 PF の学外利用は例年は年間 20 課題ほどで, 多くは他大学からの利用であるが,企業の利用もある. ただし,2020 年度は新型コロナウイルス感染症の流行の 影響を受け,4月~6月は PF を停止したため,15 課題 に減少した.現在も緊急事態宣言が発出されている区域 からの利用者は,PF への来所を自粛してもらっている.

末益氏自身,産業技術総合研究所(産総研)の微細加 エ PF のヘビーユーザであった.また,現在も広島大学・ 山口大学・名古屋大学の微細加工や微細構造解析の PF を 利用して半導体や強磁性体の研究を推進している.「最近 は研究費申請書に,共用研究設備を利用するか,新規に 研究設備を購入する場合は共用化するか,について記載 することになっていて,ナノテクノロジープラットフォー ム事業がしっかり根づいている」と末益氏は語った.

ナノテクノロジープラットフォーム事業は、「マテリア ル先端リサーチインフラ」(10年間)として引き継がれ、 データの利活用によりマテリアル研究開発を効率化・高 速化・高度化する「マテリアル DX プラットフォーム」を 構築する計画である. 筑波大学では, パワーエレクトロ ニクスやスピントロニクスなど高度なデバイス機能の発 現を可能とするマテリアル研究を重点研究領域としてい る.パワーエレクトロニクス分野では、2つの寄附講座: トヨタ自動車・デンソーの実装・回路寄附講座、富士電 機の材料・デバイス寄附講座,を2013年から運営して いる. そこで、筑波大学の「マテリアル先端リサーチイ ンフラ」としては、パワーエレクトロニクス共用システ ム機器群を微細加工 PF 機器群に加え、さらに分光エリプ ソメータやイオンミリング装置などを新規購入する計画 を立てている.



自然界には、玉虫のように美しく輝いて鮮やかな色の 生物が沢山いる. その発色の仕組みは構造色と呼ばれ, 光の波長オーダーの微細な構造によって光が干渉するこ とで色がついている.多くの場合、物質の色はその材料 に含まれる色素が光を吸収することで色がついているが. 構造色では材料の構造によって色がついているので、キ ラキラと輝いて見える. 色素のように時間経過とともに 退色することはないので、古来より装飾品に応用されて きた.

吉岡氏は、その美しい色の起源を究明したいとの思い から、構造色がどのような微細構造で生じているのか、 またそうした微細構造が生物体の中でどのように形成さ

れるのか、について興味を抱いて研究してきた [3]. 実は 構造色については、300年余以前にニュートンがクジャ クの翅の美しい色が薄膜干渉の色と類似していることを 指摘していたが、近年になって電子顕微鏡でサブ µmの 構造が観察できるようになり、また波長オーダーの周期 構造であるフォトニック結晶の研究が進展してきたこと に伴って、生物の構造色に関してより深い理解ができる ようになった.

図2は、様々な生物での構造色が、どんな微細構造で 生じているのかを概観している. 右端の玉虫は, 翅の断 面に多層膜構造があり,多層膜からの反射光が干渉する ことで玉虫色に輝いている.緑や赤と色が違うのは、多 層膜の膜厚が違うからであり、見る角度を変えると色が 変わって見えるのも多層膜干渉の特徴である.右から2 番目のクジャク(peacock)では、翅の断面は湾曲した多 層膜構造になっていて、膜内にはメラニン色素顆粒が周 期的に並んでフォトニック結晶を形成している [4]. 青や 黄と色が違っている模様は,色素顆粒の間隔が違うこと で理解できる.世界でもっとも美しい蛾と呼ばれるニシ キオオツバメガ(図2右から2番目下)も、多層膜がく るりとカールした形状をもっている.図2中央,モルフォ 蝶の美しい青色の翅の断面は、多層膜構造が切れ切れに なって筋をなし、しかも各筋の棚積み重ね周期構造は一 致することなく位相はバラバラである [5]. 図2 左から2 番目のシジミ蝶(lycaenid butterflies)の翅では、多層膜 の各層に不規則な孔が沢山空いている.図2左端のカワ セミ(kingfisher)では、膜ではなくて立体的な網目構造 になっている. どこから見てもマットな青色で, 色の角 度依存性が少ないこともこうした構造から理解できる.

構造色を生み出す主たる要因は、生物が持つ周期的な 微細構造に光が多重反射して干渉するからと理解される









lycaenid butterflies



discrete multilayer

multilayer curved multilayer structure





図2 生物の構造色の例:様々な微細構造による鮮やかな発色

が,多層膜構造だけではなく,複雑な要因が絡んでいる ことが分かってきた.多層膜干渉では,膜厚と入射角度, 光の波長で決まる干渉条件を満たす波長だけがある反射 角度で反射するはずだが,モルフォ蝶の場合,かなり広 い角度範囲で青色に輝いて見える.

図2中央のモルフォ蝶鱗粉断面構造を,多層膜が切れ 切れになって筋が並び,各筋内の棚積み重ね周期構造は そろわないで互いに相関はない,と仮定して理論計算す ると,各筋の棚構造で青色の光が反射され,かつ筋の幅 が狭いために回折効果で広い角度範囲に反射する.また, 隣り合う筋間には位相相関はないので,回折格子と同様 な干渉効果はなく,各筋による干渉回折パターンの重な りとしてモルフォ蝶独特の輝きをつくると考えられる. 周期的な微細構造だけでなく,不規則的な配列も内蔵し ているために,その生物に特有の構造色を生み出してい る [5].

クジャクの構造色の場合,メラニン色素顆粒がサブμ m周期で規則的に並んでフォトニック結晶となって干渉 色を生み出すだけでなく,多層膜が平面ではなく湾曲し ているために反射光が拡散している.さらには、メラニ ン色素顆粒が干渉光以外の背景散乱光を吸収するので, 干渉色が輝いて見える.構造色と色素吸収による発色の 複合化も,鮮やかな構造色を生み出す要因になっている [4].



吉岡氏は近年, 生物のフォトニック結晶による構造色

にフォーカスして研究している.次章で,甲虫のフォト ニック結晶による構造色について,筑波大学 PF の FIB-SEM 装置を用いて微細構造観察した結果を詳しく説明す る.その前に,アゲハ蝶のフォトニック結晶による構造 色について紹介しておく [6].

図3は、中南米に生息するマエモンジャコウアゲハ (Parides sesostris)で、黒色の翅の中に緑色に輝いてい る斑紋がある.その部分を光学顕微鏡で観察すると、図 3左のように大きさ100µm 程の緑色の鱗粉がびっしり並 んでいる.鱗粉を1枚取り出して、図3左下に描いた偏 光落射照明の顕微鏡で観察した結果が図3右である.検 出系の偏光子の向きを、照明系の偏光子の向きと同じ平 行にするか、直交させるかで大分様子が異なる.直交偏 光で見ると、ステンドガラス状に沢山のドメインに分割 され、色も一様でなくドメイン毎に異なっている.一方、 平行偏光の場合は、反射強度は直交偏光より10倍大きい が(強度をフィルタで1/10に落として撮影している)、 ほぼ一様に黄緑色に見える.何故、偏光によって見え方 が異なるのか?

その謎を解くために, 鱗粉の内部構造を SEM 観察した. 図4左下の低倍率では, 各鱗粉の表面に長軸方向の筋構 造(リッジ)が観察される. さらに, 鱗粉を切断して断 面を高倍率で観察した像が, 図4右である. 断面は3つ の層から構成されていて, 表面部のリッジの下はハニカ ム層(ハチの巣状の柱状構造)になっていて, 最下層に 構造色の起源となる周期的な網の目構造のフォトニック 結晶が観察される. この構造はジャイロイド型と呼ばれ, 「3方向に無限に連結した3次元の周期極小曲面」で,連 結部の3本の足が回旋しているように見えることから命 名された(4.2節の図10を参照).



図3 アゲハ蝶の鱗粉の反射偏光特性



図4 アゲハ蝶の翅のフォトニック結晶(SEM 観察)

しかし、このフォトニック結晶は大きさ約 100µm の鱗 粉全体にわたって単結晶になっているのではなく、10um 程の多結晶に分れている. 鱗粉上層のリッジやハニカム 層をガラスピペットで取り除いて,フォトニック結晶層 の表面だけを SEM 観察すると、網の目構造の向きが部分 部分で違っていて、網の目の向きが違う境界が、多結晶 ドメインの境界になっている. ドメイン毎に網の目の向 きは異なるが、同じ表面構造を持っている. この表面構 造はジャイロイド構造の [110] 面に対応していることが、 理論計算との比較から分かった. この [110] 面は、ジャ イロイド型構造のフォトニックバンド計算によると、緑 色に対応するバンドギャップを持つために、平行偏光で 鱗粉全体は緑色に見えている.一方,直交偏光ではドメ イン毎に[110] 面の回転配向がバラバラなので(表面に 垂直な軸を中心に回転自由度がある)、回転角度に依存し て反射率が異なるために,ステンドガラス状の模様が見 えることになる.

多結晶なジャイロイド型フォトニック結晶が,構造色の起源になっていることが解明された.それでは,蝶の 翅にあるジャイロイド構造はどのように形成されるの か?どうやって表面配向を [110] 面に揃えているのか, という生物内の形成過程については謎のままである.

4. FIB-SEM 装置を用いた甲虫の微細構 造観察

吉岡氏は、フォトニック結晶による構造色が蝶以外に ないか?多結晶でありながら、特定の面に方位を揃えて 構造色を生み出している生物は他にないか?との方針か ら、2種の甲虫:ゾウムシとカミキリムシを研究対象に選 んだ.また、筑波大学微細加工 PF の FIB-SEM 装置を利 用して, Slice & View 法でフォトニック結晶の3次元構 造解析に取り組んだ.以下,先ずゾウムシの微細構造観 察から紹介する.

4.1 ゾウムシのフォトニック結晶(ダイヤモンド型)による構造色 [7][8]

ゾウムシは図5左の写真に示したように,翅が金緑色 に輝く,体長2cm程の甲虫で,口部がゾウの鼻のように 伸びているのでゾウムシと呼ばれる.ゾウムシ類は世界 で6万種も知られており,筑波大学の末益氏の自宅庭に あるオリーブの木の根元に20~30匹生息しているのを 発見したとのエピソードを伺った.観察対象としたのは, *Lamprocyphus augustus*という名の南米に生息するゾウ ムシの美麗種である.体表には鮮やかな色を持つ鱗片と 呼ばれる丸くて薄い板が,びっしり並んでいる.

図5中央は、ゾウムシの鱗片を1枚取り出したもので、 長さ100µm×幅50µm程で表面はなだらかな曲面になっ ている. 鱗片内部の構造を観察するために, 鱗片表面を FIB で取り除いた.図5右は、FIB-SEM 装置で鱗片表面 のクチクラと呼んでいる堅い膜を除去する実験配置を描 いている. クチクラは、表層細胞から分泌される主にた んぱく質でできている保護膜である. 鱗片試料をアルミ ニウム製の試料台の角に置き, FIB からの Ga イオンビー ムを鱗片に平行に照射する. 当初は鱗片の垂直方向から 照射してクチクラを除去しようとしたが、クチクラだけ でなくその下にあるフォトニック結晶まで壊してしまい, 観察できなかった. 鱗片の真横から Ga イオンビームを 照射すると、鱗片表面がなだらかにカーブしているので、 薄いクチクラ層をきれいに除去できる. 「観察したいフォ トニック結晶にダメージが残らないように、弱いビーム 電流(83pA)でゆっくり時間をかけて慎重に加工を施し



図 5 ゾウムシ鱗片の FIB-SEM による表面クチクラ除去と観察

た」と中島氏は振り返った. クチクラを除去した後, フォ トニック結晶表面を SEM で観察した.

図6はSEM観察結果で、図6左上の鱗片の表面クチク ラ層を除去した赤色枠内を拡大して観察したSEM像が、 図6右である。網の目状のフォトニック結晶が見えてい る.黒色の穴は空気で、一つの穴の周囲には6つの穴が 60度間隔で囲んでいる。写真下部のスケール(2µm)を 参照すると、2つの穴の間隔は300nm程であり、光の波 長で干渉を起こすサイズになっている。この微細構造が 構造色をもたらしていると考えられる。

図6右のSEM像を仔細に観察すると、網の目の模様 は同じでも場所場所で模様の回転向きがマチマチである ことが分かる(3本の赤線が360度を6分割したマーク を参照). つまり、鱗片全体は一様な単結晶ではなく、約 10µmサイズのドメインに分割された多結晶になってい る.ただし、ドメインの配向は全くのバラバラではなく、 鱗片表面に垂直な方向に揃っている.図6左の模式図は、 多結晶のドメイン配向の様子を描いたものである.第3 章でアゲハ蝶鱗粉のフォトニック結晶においても,多結 晶ドメインの表面配向はそろっていることを紹介したが, それと同様である.

次に、FIB-SEM 装置を用いてフォトニック結晶の3次 元構造を再構築することで、フォトニック結晶の構造タ イプや表面配向方向を解析した.図7左はSlice & View の配置で、FIB 加工と SEM 観察を繰り返すことで連続し た断面像を得る.図7右はSlice & View を開始する前に、 赤色枠内を観察領域に設定した SEM 像である.観察領域 の面積は 1.91µm × 3.01µm, 1回の FIB 削り幅 (Slice 幅) は 17nm, Slice & View を 80回繰り返すことで 80枚の 断面 SEM 像を取得し、17nm × 80回=1.39µmの深さ にわたり観察した.FIBのGaイオン加速電圧は 30kV,ビー ム電流は 33pA でゆっくり時間をかけて実施した.夕方 までに FIB-SEM の条件設定が決まれば、Slice & View の 連続操作は装置が自動で行うので、翌朝には 80枚の断面 SEM 像が得られている.80枚の SEM 像を元に、専用ソ フトウェアで 3 次元再構築して、ゾウムシ鱗片のフォト



図6 ゾウムシのフォトニック結晶の表面配向 SEM 観察

FIB-SEMによるSlice&View



図7 FIB-SEM 装置による Slice & View で3 次元構造を再構築

ニック結晶構造の3次元実験データを得た.

図8右は、ゾウムシのフォトニック結晶構造を FIB-SEM 装置で Slice & View して取得した 3 次元再構築実験 データの単位胞で、この構造が XYZ の 3 方向にネット ワーク状に繋がっている。大部分は空気の穴になってい て、クチクラが四つ又の腕を出して網の目を形成してい る.図8左は、フォトニック結晶がダイヤモンド型だと 仮定して理論計算で求めた構造である。ダイヤモンドで は炭素(C)が4つのCと互いに共有結合して面心立方晶 の結晶構造を取っているのと同様に、単位胞の頂点位置 と面心の位置に水色で示したクチクラの塊の断面が見え る。単位胞の内部には、四つ又の構造が4つ存在している。 図8の左右を比較して、フォトニック結晶の構造がダイ ヤモンド型であることが分かる。

実験で求めた3次元再構築物を,コンピュータ上で回

転させて別の角度から眺めると、空気の穴が貫通してい るように見える角度がある。例えば、[110]の方向から眺 めると穴が貫通しており、理論計算によるシミュレーショ ン結果とも一致した.これらの結果から、ゾウムシのフォ トニック結晶構造はダイヤモンド型であると確証した.

ゾウムシのフォトニック結晶構造はダイヤモンド型で あることが分かったので,図6で観察したフォトニック 結晶の表面は,ダイヤモンド型の[111]面を見ていたこ とになる.多結晶のドメインに分割されているが,表面 配向はどのドメインも同じ[111]面になるように揃えて いる.そこで,次にこれらの情報をベースにして,ゾウ ムシ鱗片の光学特性を調べてみた.

図9左は、ゾウムシ鱗片の反射スペクトルで、複数ある曲線データは、図9左下に示した鱗片上の5つの測定 点に対応している.鱗片上のどの場所でも、ほぼ同じ反



図8 ダイヤモンド型のフォトニック結晶単位胞; (左)ダイヤモンド型の理論計算、(右) Slice & View で再構築した実験



図9 ゾウムシ鱗片の反射スペクトルの測定結果(左)とフォトニックバンドの計算結果(右)

射スペクトルで、550nm ~ 650nm に反射強度が高くな る帯域がある.図9右は、ダイヤモンド型フォトニック 結晶を仮定したフォトニックバンド計算結果である.横 軸は電磁波の波数(結晶方向)、縦軸は周波数(エネル ギー)で、実験から求めたパラメータを使って計算した. t=0.15 はクチクラが空間に占める割合、n=1.515 はクチ クラの屈折率、a=401nm は単位胞の一辺の長さである.

図9右のフォトニックバンド計算結果では、横軸のL 点([111]方向)でのバンドギャップエネルギーが光の波 長としては557nm~629nmの波長帯に対応している. このバンドギャップの波長の光は結晶を通過できないで 反射する.即ち,この計算結果は、図9左の実測データ とよく一致しており、ダイヤモンド型フォトニック結晶 の[111]面からの反射,発色であることをさらに支持する.

4.2 ヒメミドリホウセキカミキリのフォトニック 結晶 (I-WP型) による構造色 [9][10]

アフリカに生息するカミキリムシで,鮮やかな緑色の 発色が特徴のヒメミドリホウセキカミキリ(Sternotomis callais callais,図10右上欄外)を対象に,鱗片の微細構 造を観察して,3次元構造解析を行った.

観察と解析の結果,このカミキリムシの構造色もフォトニック結晶によるもので,I-WP型のフォトニック結晶と結論した.I-WP型のIは体心立方晶(図10表の右端中段),WP(Wrapped Package,図10表の右端下段)は立方体にリボンをかけたような形状に見えることから命名された構造である.体心立方晶の単位胞を理論計算したもの(図10表の右端中段)は、立方晶の体心にクチクラの塊があり、そこから8つの頂点に向かってクチク

ラの腕が延びた構造になっている. この単位胞が XYZ の 3 方向に周期的に繰り返されたネットワーク構造が,実験 から再構築したカミキリムシ鱗片の 3 次元構造と一致し た. また,体心立方晶の [110] 面が鱗片の表面に配向し ていることで,緑色に見えることも判明した.

図10の中の表は、生物のフォトニック結晶で4つの 型;プリミティブ型、ジャイロイド型、ダイヤモンド型、 I-WP型について比較対照したもので、表の上の欄外に構 造色を示す昆虫の例を載せている.表の1行目は、フォ トニック結晶構造を表す近似式で、3次元で周期的な"極 小曲面"を表している、"極小曲面"とは、「曲面上のあ らゆる点で平均曲率が0となる曲面」と定義され、三角 関数の比較的単純な数式で表される.曲面上の任意の点 で、最大曲率と最小曲率が正負が逆で、その和は0となり、 鞍状の曲面になっている(図11).その曲面の内側にク チクラが分泌されている場合(上段の近似式の場合)が 表の2段目、外側に分泌されている場合(近似式の不等 号を反転させた場合)が3段目である.

プリミティブ型とダイヤモンド型では,極小曲面の内 側を埋めたものと外側を埋めたものと全く同じになる. ジャイロイド型では,内側・外側を埋めたものは右巻き と左巻きの鏡像関係になって異なり,アゲハ蝶ではどち らの構造も見つかっているので,クチクラが分泌される 向きは制限されてない. I-WP 型では内側を埋めたものが 体心立方晶 (I型),外側を埋めたものは WP 型で全く異 なる構造になり,カミキリムシでは I 型しか見つかってな いので内側にクチクラを分泌するように制限されている.

吉岡氏は,生物のフォトニック結晶の生成過程に強い 関心を抱いている;

・昆虫はさなぎの中で翅を作る時に、どのようにフォ



図 10 各種フォトニック結晶構造の特徴と生成過程

トニック構造を作っているのか?

・アゲハ蝶はジャイロイド型,ゾウムシはダイヤモン ド型,カミキリムシは I-WP 型と,いくつか取り得る フォトニック結晶構造の中で,どのような仕組みで選 択しているのか?

図10右下の模式図に描いたように、昆虫では翅を構成 する細胞にある滑面小胞体(黄色部)が、細胞膜(黒線) の外(朱色の部分)にクチクラを分泌してフォトニック 結晶構造を作っている.フォトニック結晶のタイプとし ては、図10の表に挙げた4種類だけでなく、未だ発見さ れてない構造もあるかもしれない.原子の結晶構造では 空間群の230種類の中で、100種類程が実在する.フォ トニック結晶でも対称性だけで考えると同程度のタイプ が考えられるが、構造色を呈するためにバンドギャップ が広くなるようなフォトニック結晶構造を選択するよう に、何らかの制御をしているものと思われる.

「生物の構造色を工業製品に応用する"バイオミメ ティックス"を考えると、生物内でのフォトニック結晶構 造の生成過程の究明は大きな課題である」と吉岡氏は強 調した.構造色の応用製品は、自動車の車体塗装、化粧 品や衣類への応用など、既にある程度進展している.し かし、細胞の外にミクロでより複雑なフォトニック結晶 構造をどのような生成過程で作っているか、フォトニッ ク結晶構造の曲面の曲率制御をはじめ構造制御の仕組み が解き明かされれば、製造コストの観点も含めて"バイオ ミメティックス"へのインパクトは大きい、と期待される.

また, 吉岡氏は次のように話し, 研究成果が大学院生 との共同研究で得られたことを強調していた. 「ゾウムシ



の研究は海老原君,カミキリムシの研究は小林さんとの 共同研究です. PF で得られたデータを彼らが注意深く解 析してくれたので,鮮やかな色の背後にある複雑な網目 構造を決定することができました.」



生物がもつ鮮やかな構造色が、フォトニック結晶など 波長オーダーの周期構造に起因することが明らかにされ、 FIB-SEM 装置による 3 次元構造解析でフォトニック結晶 構造の複数のタイプが存在することが確認された. 生物 がそうした微細なフォトニック結晶を、どのような仕組 みで自己組織化して形成しているのか、生物学と物理学 の境界領域にわたる奥深い研究テーマが今後さらに進展 することを期待したい.



- [1] 筑波大学 微細加工プラットフォーム: http://www.u-tsukuba-nanotech.jp/
- [2] 針山 孝彦,村上 勝久, "FIB-SEM によるデンプン顆 粒内空洞の観察", NanotechJapan Bulletin Vol. 8, No. 1 (2015): https://www.nanonet.go.jp/ntjb_pdf/ nanotechEXPRESS-38.pdf
- [3] 東京理科大学 吉岡研究室 HP: http://www.yoshioka-lab.com/index.html
- [4] S.Yoshioka and S.Kinoshita, "Effect of Macroscopic Structure in Iridescent Color of the Peacock Feathers", Forma, Vol.17, pp.169–181 (2002) : http://www.scipress.org/journals/forma/ pdf/1702/17020169.pdf
- [5] S.Kinishita, S.Yoshioka, Y.Fujii and N.Okamoto,
 "Photophysics of Structural Color in the Morpho Butterflies", Forma, Vol.17, pp.103~121, (2002) : http://www.scipress.org/journals/forma/ pdf/1702/17020103.pdf

- [6] 吉岡 伸也,"蝶の鱗粉のジャイロイド構造:配向 特性と偏光特性",第63回高分子学会,(2014): http://www.yoshioka-lab.com/presentation/ abstract/2014koubunshi.pdf
- [7] 吉岡 伸也,海老原 稜,加藤 一郎,中島 清美,"甲虫 の微細構造観察",微細加工 platform 平成 27 年度 成果事例:https://www.nanonet.go.jp/case/content/ case/NP/F/BA/F-BA-2015-001/H27-F-BA-01.pdf
- [8] R.Ebihara, H.Hashimoto, J.Kano, T.Fujii and S.Yoshioka, "Cuticle network and orientation preference pf photonic crystals n the scales of the weevil Lamprocyphus augustus", J.R. Soc. Interface, Vol.15, 20180360 (2018) : https://royalsocietypublishing. org/doi/pdf/10.1098/rsif.2018.0360
- [9] 小林 由桂, 吉岡 伸也, "ホウセキカミキリの一種のフォ トニック結晶", 日本物理学会 2019 年秋季大会 概要 集, 13aPS-93
- [10] Y. Kobayashi, R. Ohnuki and S. Yoshioka, "Discovery of I-WP minimal-surface-based photonic crystal in the scale of a longhorn beetle", J.R. Soc. Interface, (2021): https://doi.org/10.1098/rsif.2021.0505

(図1は末益氏から,図2~11は吉岡氏から提供された)

(尾島正啓)

