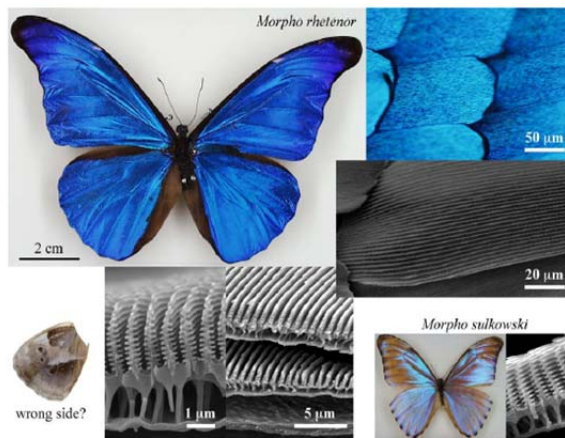


1. 序

今回、鳥取大学医学部解剖学教室の稲賀すみれ講師のご好意により、鳥大所有の走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, 通称 SEM) により蝶の鱗粉観察を行うことができたので、結果を簡単にレポートする。

蝶の翅は多彩な色彩の鱗粉で覆われているが、これらの作り出す色彩は多くの人を魅了し、その発色メカニズムについても古くから興味を持たれていた。20世紀初頭の偉大な物理学者であるL.レイリーやA.A.マイケルソンなども研究を行い、すでに、鱗粉表面の微細な構造による光の回折・干渉によるもの(構造色)であることをつきとめている。しかし、発色メカニズムの詳細がつきとめられたのはSEMによる表面の微細構造が観察できるようになってからである。特に、翅が大きく、強烈なメタリックブルーを持つモルフォチョウの鱗粉は多くの研究者を刺激し、詳細に調べられ、その発色メカニズムはほぼ解明されている。また、それを応用した商品なども現れている。モルフォチョウの鱗粉はリッジと呼ばれる鱗粉の配列方向に走る線状の筋が多数のひだを有する棚構造を作っている。(図1-1)これは、クチクラ層と空気層が交互に並ぶ多層膜構造と考えることができ、その厚さと屈折率の組み合わせにより、多層膜内部での多重反射から特定の波長の光(モルフォチョウの場合は青色)を強力に反射することが可能になる。また、多層膜による多重反射以外にも、光を広らせる仕組みや、干渉により特定の方向にだけにしか光が反射しないことを防止する仕組み(非干渉性の光)など多彩な光学現象を見ることができる。(図1-2)

日本に棲息するミドリシジミの仲間には、翅は小さいものの強力な金属色を発するものがあり(この場合は青色~緑色)、蝶愛好家には親しまれている。その中の何種類かについては、詳細な反射率測定や鱗粉表面のSEM観察、また透過電子顕微鏡(Transmitting Electron Microscope 通称TEM、数百万倍まで観察可能)を用いた鱗粉断面の構造解析などが行われており、徐々にその発色メカニズムも明らかになってきている。今回は♂の翅表面が青緑色に輝くウラジロミドリシジミ♂と翅表が褐色の中に紫色の斑紋を有するミドリシジミ♀AB型の鱗粉をサンプルに、走査電子顕微鏡(SEM)による鱗粉表面の微細構造の観察を行った。



構造色の代表、モルフォ蝶(レテノール) *Kise of Structural Color Morpho Butterflies (rhetenor)* 山田順 :J.H.T.S.J, Vol.47, No.201 (2008) から引用

図1-1. モルフォチョウとその鱗粉の構造

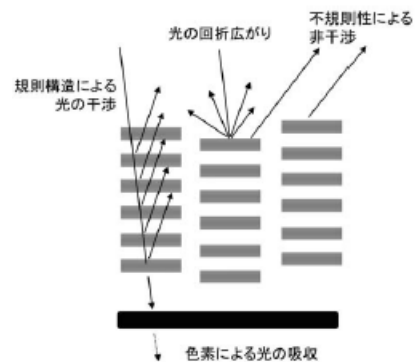


図11 モルフォ鱗粉の切れ切れの多層膜モデル。縦方向に周期的に並んだ板は、干渉をおこして青色を反射する(左側の列)。一枚の板からの反射は幅広い角度に回折広がり起こす(中央の列)。隣り合う板は高さに分布が存在するため、回折格子としては機能しない。また、下側には黒線で示したメラニン色素が存在し、棚構造を透過した光を吸収し、背景を暗くする働きがある。

図1-2. モルフォチョウ鱗粉の発色機構
吉岡伸也 : 比較整理生化学 Vol.25, No.3 p.86 (2008)から引用

2. 観察手法

走査電子顕微鏡（SEM）は、低倍率（数十倍）から高倍率（数十万倍）までの広い倍率で個体表面の観察が可能で、光学顕微鏡に比べ焦点深度が深く立体的な画像が得られる。また、X線分析装置を用いた元素分析やルミネッセンス像（CL）、試料電流像（EBIC）などいろいろな物性観察も可能であることから、産業界・医学界など多くの分野で幅広く使われている。

蝶の鱗粉の発色機構（構造色）の研究には、その表面構造を詳細に調べるには最適な手法であり、古くから使用されている。

・使用装置

日立卓上顕微鏡 TM3030 （鳥取大学医学部解剖学講座 所有）

倍率：x15～x60,000、加速電圧：5kV/15kV、検出系：二次電子、反射電子

試料サイズ：70mm（径）、50mm（厚さ）

この装置はコンパクトで、低真空観察が可能のため絶縁物資料でも帯電防止のための前処理が不要であり、試料交換時間も短くできるなど、蝶の鱗粉観察には最適である。ただし、分析系は附属していないため、詳細な元素分析は不可能であるが、反射電子像の観察により簡易的な分析は可能である。



図 2-1. 日立卓上顕微鏡 TM3030 外観



図 2-2. 日立卓上顕微鏡 試料搬送機構



図 2-3. 日立卓上顕微鏡 試料ホルダーと サンプル（ウラジロミドリシジミの後翅裏面）

3. 観察結果

3-1. ウラジロミドリシジミの前羽表面の SEM 観察結果

観察部位は図 3-1 の赤丸あたり

図 3-2 の低倍観察（x40）では、縁毛、黒色部、青緑色部が上方より順に観察される。翅脈と思われる部分も観察される。黒色鱗粉と青緑色部鱗粉は先端がカールしているかどうかで区別できる。図 3-3 の x100 観察ではこの違いが明瞭に観察される。



図 3-1. ウラジロミドリシジミ (参考文献 13 より引用)

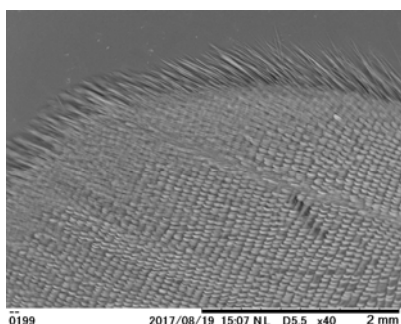


図 3-2. ウラジロミドリシジミの前翅表面 (x40)

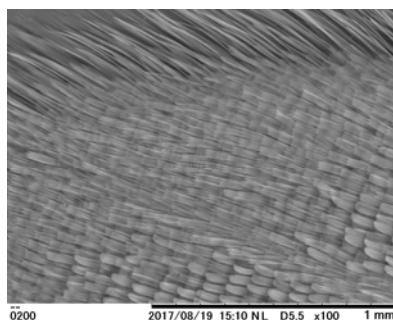


図 3-2. ウラジロミドリシジミの前翅表面 (x100)

(1) 黒色部鱗粉の高倍率観察

図 3-3. の x500 観察で、黒色部鱗粉の形状は先端が刀状になった比較的平坦な形状である。鱗粉の並びが同一方向を向いた下層・上層の 2 層からなっていることが観察される。

図 3-4. の x1500 観察で、鱗粉の表面上で配列方向に走るリッジとそれに垂直方向のクロスリブが観察される。リッジとクロスリブにより周期的な二次元格子が形成されている。

図 3-5. の x20,000 観察からリッジ間隔 $a \sim 1.5 \mu\text{m}$ 、クロスリブ間隔 $b \sim 0.5 \mu\text{m}$ と計測される。また、格子の乱れも観察される。

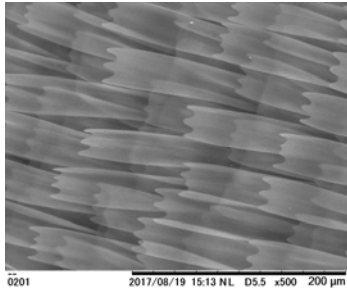


図 3-3. ウラジロミドリシジミ♂前翅表面黒色部 (x500)

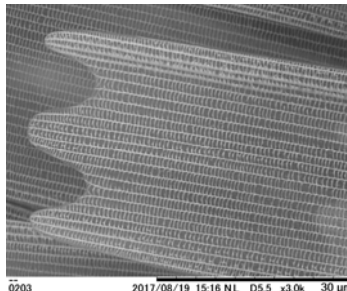


図 3-4. ウラジロミドリシジミ♂前翅表面黒色部 (x1,500)

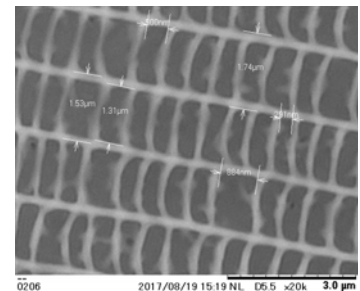


図 3-5. ウラジロミドリシジミ♂前翅表面黒色部 (x20,000)

(2) 青緑色部鱗粉の高倍率観察

図 3-6. の x 500 観察で、先端のカールした青緑色鱗粉が上層に配列される様子が観察される。

図 3-7. の x 1,500 観察で、上層の青緑色鱗粉の表面構造が、黒色部鱗粉と異なっていることが観察される。配列方向に走るリッジは明瞭にかんさつされるが、クロスリブは観察されない。(横に走る模様は下層の周期構造との干渉によるもので実際の構造とは関係ない) 下層鱗粉にはクロスリブが明瞭に観察され、下層鱗粉は翅縁と同様な黒色鱗粉が配列されていると考えられる。

図 3-8. の x15,000 観察から、上層の青緑色鱗粉のリッジ間隔 $a \sim 2.15 \mu\text{m}$ 、下層部鱗粉のリッジ間隔 $a \sim 1.15 \mu\text{m}$ クロスリブ間隔 $b \sim 0.4 \mu\text{m}$ と計測される。(下層鱗粉の数値は翅縁の黒色部と比べ若干小さい) 上層鱗粉のリッジ間に見られる模様はアモルファス (有機物) 構造によるものと推測され、有機膜の存在が示唆される。

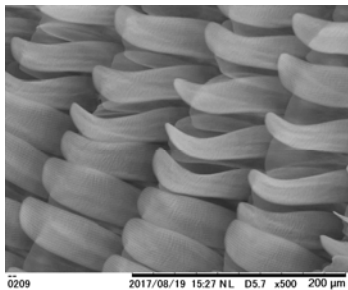


図 3-6. ウラジロミドリシジミ♂前翅表面青緑色部 (x500)

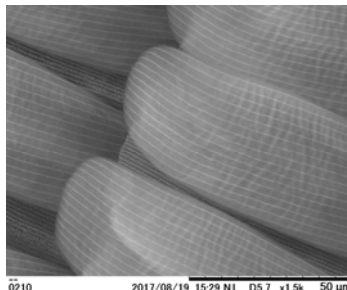


図 3-7. ウラジロミドリシジミ♂前翅表面青緑色部 (x1,500)

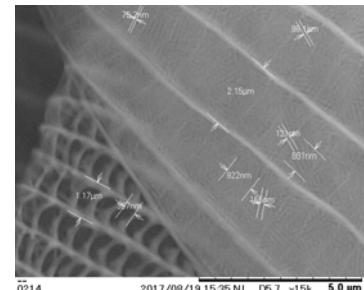


図 3-8. ウラジロミドリシジミ♂前翅表面青緑色部 (x15,000)

3-2. ウラジロミドリシジミ♂前羽表面の SEM 観察結果

観察部位は、図 3-9 の赤丸あたり。

図 3-10. の低倍観察 (x40) で、後翅の微状突起基部に見られるオレンジ色斑の中の黒点が上部中央付近に観察される。以下の黒点部鱗粉はこの部分の鱗粉を指す。写真下方、斜めに走る線は翅脈と思われるが定かでない。

(1) 裏面黒点部鱗粉の高倍率観察

図 3-12. の x500 観察で、裏面円形黒色部鱗粉の形状は、表面の翅縁黒色部鱗粉と同様で、先端が波状の比較的平坦な構造をしていることがわかる。

図 3-13. の x5,000 観察で、翅表黒色部鱗粉同様リッジ及びクロスリブが観察されるが、クロスリブはより密になっているように見える。

図 3-14. の x10,000 観察で、リッジ間隔 $a \sim 1.5 \mu\text{m}$ クロスリブ間隔 $b \sim 0.5 \mu\text{m}$ で前翅表縁の黒色鱗粉とほぼ同じであるが、クロスリブの幅が広がり破れた膜のように見える。



図 3-10.ウラジロミドリシジミ♀裏面
(参考文献 13 より引用)

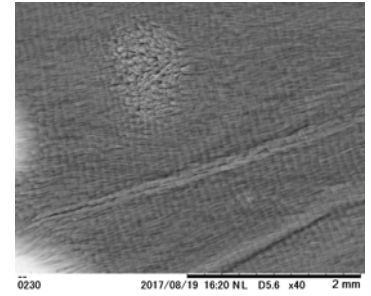


図 3-11. ウラジロミドリシジミ♂後翅裏面黒点部 (x40)

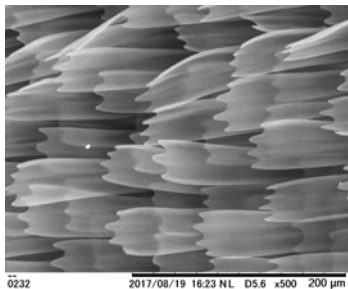


図 3-12. ウラジロミドリシジミ♂後翅裏面黒点部 (x500)

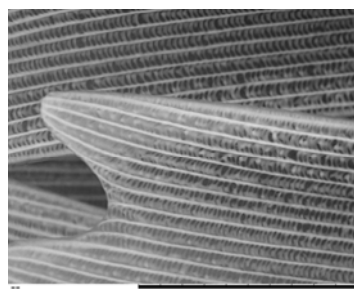


図 3-13. ウラジロミドリシジミ♂後翅裏面黒点部 (x5,000)

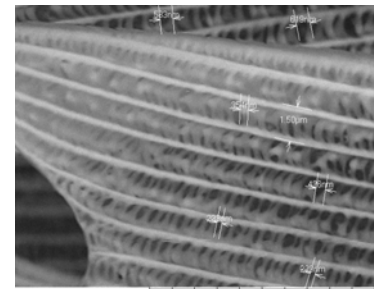


図 3-14. ウラジロミドリシジミ♂後翅裏面黒点部 (x10,000)

(2) 裏面白色部の高倍率観察

図 3-15. の x250 観察で、裏面白色には線状のおのが多数観察される。線状部分は撥水効果を示すと考えられる。線状部分は鱗粉先端から派生しており、波状部の一部が異常に長くなったものであることがわかる。裏面白色部鱗粉の形状は、表面黒色鱗粉及び裏面黒色鱗粉と同様(先端が波状で、平坦)である。鱗粉の配列は他の部分同様、上層、下層の 2 層配列のように見える。

図 3-16. の x 5,000 観察で、線状部分は鱗粉本体同リッジとクロスリブから成る格子 ($a \sim 1.9 \mu\text{m}$, $b \sim 0.5 \mu\text{m}$) を形成している。

図 3-17. の x5,000 観察で、白色部鱗粉の表面構造は、裏面黒色鱗粉、表面黒色鱗粉と同様であることが観察される。

図 3-18. の x8,000 観察で、線状部分の幅は $\sim 3.4 \mu\text{m}$ 、鱗粉本体のリッジ間隔 $a \sim 1.5 \mu\text{m}$ 、クロスリブ間隔 $b \sim 1.0 \mu\text{m}$ と計測される。クロスリブ間隔は黒色鱗粉のそれより広い。

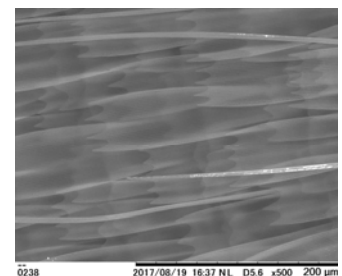


図 3-15. ウラジロミドリシジミ♂後翅裏面黒点部 (x250)

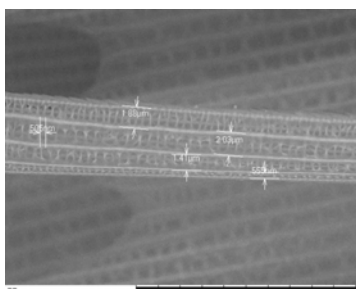


図 3-16. ウラジロミドリシジミ♂後翅裏面黒点部 (x5,000)

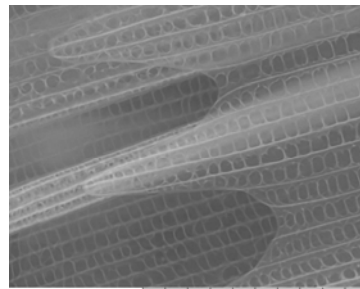


図 3-17. ウラジロミドリシジミ♂後翅裏面黒点部 (x5,000)

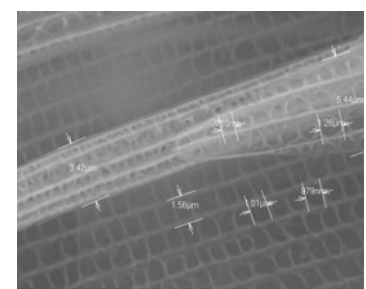


図 3-18. ウラジロミドリシジミ♂後翅裏面黒点部 (x8,000)

3-3. ミドリシジミ♀ (AB型) 前翅表面の SEM 観察結果

観察部位は図 3-19 の赤丸あたり。

(1) 紫色部鱗粉の観察

図 3-20 の x40 観察で、中央近くに黒く見える穴は、目印のため人為的につけたもの。横に走る鱗粉のない部分は翅脈と思われるが定かではない。



図 3-19. ミドリシジミ♀ (AB型)
(参考文献 13 より引用)

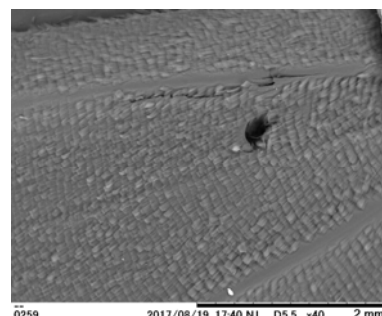


図 3-20. ミドリシジミ♀前翅表面
紫色部 (x40)

図 3-21 の x150 観察で、鱗粉配列が上下 2 層であること、鱗粉形状はウラジロ

ミドリシジミの黒色鱗粉に類似していること、先端がカールしているものがあることが観察される。

図 3-22. の x1,200 観察で、紫部鱗粉の表面構造はウラジロミドリシジミの緑青色鱗粉に類似している (リッジは明瞭に観察されるが、クロスリブは観察されない) ことが観察される。

図 3-23 の x10,000 観察で、リッジ間隔 $a \sim 2.8 \mu\text{m}$ と計測される。これは、ウラジロミドリシジミの鱗粉 (黒色、白色、青緑色含め) のリッジ間隔の約 2 倍と広い。リッジ間の構造はウラジロミドリシジミの青緑色鱗粉と同様のアモルファス (有機物) 構造のように見えるが、色素粒が敷き詰められているようにも見えなくもない。

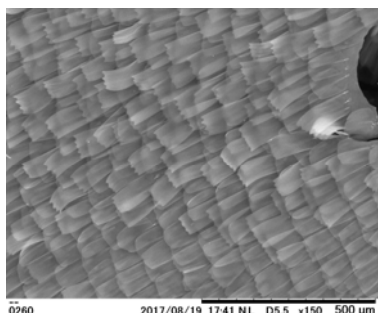


図 3-21. ミドリシジミ♀前翅表面
紫色部 (x150)

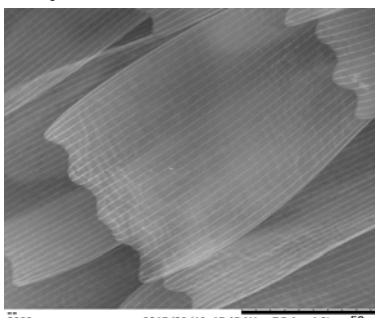


図 3-22. ミドリシジミ♀前翅表面
紫色部 (x1,200)

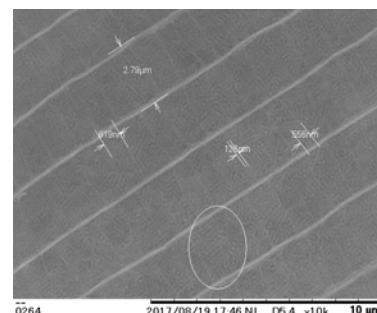


図 3-23. ミドリシジミ♀前翅表面
紫色部 (x10,000)

(2) 褐色部鱗粉の観察

図 3-24 の x40 観察で、横に走る線状部分は何かは定かでない。人為的に引っ掻いたキズとも思われる。

図 3-25 の x500 観察で、褐色部鱗粉の形状は紫部鱗粉と類似しているが配列方向により細長くなっている。先端のカールした鱗粉はほとんど見られない。配列も基本上下の 2 層構造と思われる。

図 3-26 の x1,500 観察で、リッジ及びクロスリブからなる表面格子構造が明瞭に観察される。

図 3-27 の x5,000 観察で、リッジ間隔 $a \sim 1.6 \mu\text{m}$ 、クロスリブ間隔 $b \sim 0.9 \mu\text{m}$ と計測される。ウラジロミドリシジミの黒色鱗粉と比較すると、リッジ間隔は同程度であるがクロスリブ間隔は広い。

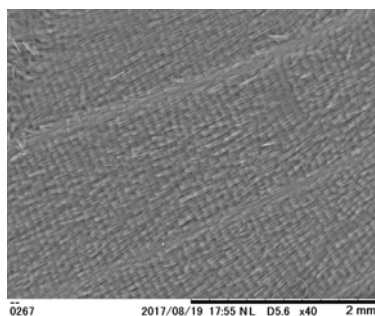


図 3-24. ミドリシジミ♀前翅表面
紫色部 (x40)

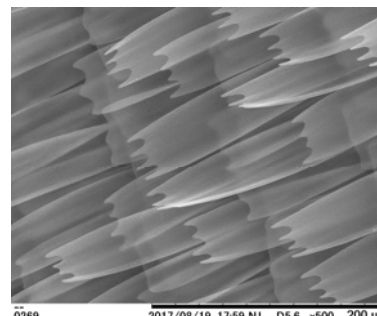


図 3-25. ミドリシジミ♀前翅表面
紫色部 (x500)

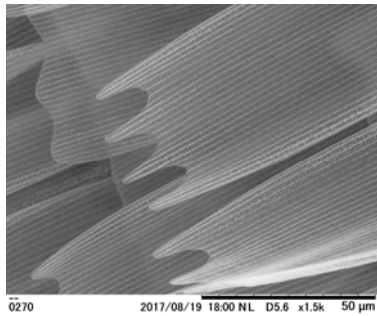


図 3-26. ミドリシジミ♀前翅表面
紫色部 (x1,500)

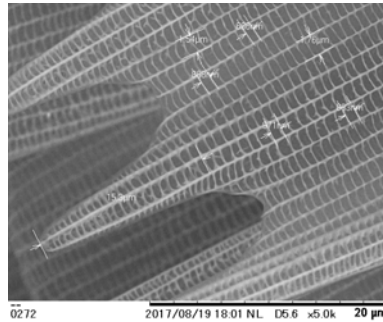


図 3-27. ミドリシジミ♀前翅表面
紫色部 (x5,000)

3-4. ソケット部の SEM 観察結果

図 3-28 の x1,000 観察で、鱗粉基部の突起が翅基板のソケットに挿入されているのが観察される。

図 3-29 の x5,000 観察で、鱗粉突起部の径 $\sim 3.2\mu\text{m}$ 、翅基板ソケット径 $\sim 5.10\mu\text{m}$ と計測される。また、鱗粉基部突起付近にリッジ間の薄膜部分にあいた穴がいくつか観察されるのが注目される。

図 3-30 の x250 観察は、鱗粉がほとんど剥がれ落ち翅基板が露出した部分であるが、基板のソケット列が鱗粉の配列と垂直方向に 2 列並行にならんでいるのが観察される。下層鱗粉用と上層鱗粉用の 2 列であると考えられる。

図 3-31 の x2,000 観察で、翅基板に押付けられ翅基板にはりついた鱗粉が残存しているのが観察される。

(注)ソケットの効能について:蝶の鱗粉のはたす役割はいくつか考えられている。翅の色・斑紋などにより、種の判別を行うことが最も大きいことであるが、次のような役割も指摘されている。“鱗粉は取れやすいので、クモの巣にとらえられた場合でも(服を脱ぐかのように)鱗粉だけを巣に残して脱出できる”。ソケットに挿入された構造はこの効果を示唆しており、さらに 2 層構造になった下層の鱗粉は抜けにくくなっており、上層鱗粉のみが滑るように抜けることでこの効果が倍増されるとのことである。しかし、筆者はこのような現場に遭遇したことはないし、文献でも具体的な事例が示されているのを見たことない。理屈としてはもっともらしいが、にわかには信じがたい指摘であると思う。

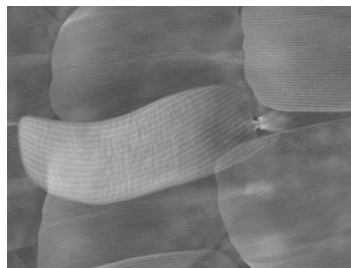


図 3-28. ウラジロミドリシジミ♂
前翅緑色鱗粉とソケット (x1,000)



図 3-29. ウラジロミドリシジミ♂
前翅緑色鱗粉とソケット (x5,000)

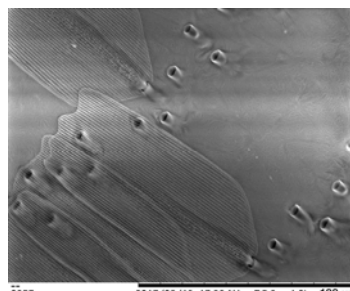


図 3-30. ミドリシジミ♀前翅表
鱗粉の剥がれ落ちた部分と
ソケット (x250)

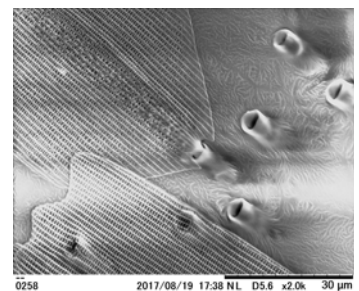


図 3-31. ミドリシジミ♀前翅表
鱗粉の剥がれ落ちた部分と
ソケット (x2,000)

4. 考察とまとめ

♂の翅表面が青緑色に輝くミドリシジミの仲間のなかで、キシマミドリシジミは光学測定や SEM による鱗粉の構造解析が比較的詳しく行われており、その発色メカニズムについても少しずつわかってきている種である。以下にその結果について要約し、今回のウラジロミドリシジミ♂とミドリシジミ♀の SEM 観

察結果との対比を行う。

・キリシマミドリシジミの鱗粉について、文献（参考文献9）・10）からの要約。

- 1) 垂直入射での反射率は♂緑色部で、 $\lambda \sim 547\text{nm}$, 341nm , 270nm にピークを持つ。♀の紫色部は $\lambda \sim 395\text{nm}$ にピークを持つ。 $\lambda \sim 547\text{nm}$ は可視領域、それ以外は UV 領域である。ピークの反射率は 25%~40%。
- 2) どの鱗粉もリッジ及びクロスリブが明瞭に観察される。リッジ幅 $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$ 、リッジ間隔 $1.5\sim 3\mu\text{m}$ で、多層膜反射をするモルフォチョウやフォトニック結晶を造るオオムラサキ♂紫色部の鱗粉のリッジに比べ幅及び幅/間隔が小さい。また、リッジ表面を覆う層は1層のみである。（オオムラサキ♂では7層）
- 3) ♂青緑鱗粉及び♀紫鱗粉の先端部はカールしている。♀褐色鱗粉はカールせずその先端は波状になっている。
- 4) ♂青緑色部及び♀紫鱗粉のリッジとクロスリブで囲まれる領域の底には有機層（クチクラ/空気・・の多層膜、♂で7層♀で3層）が存在する。♀紫鱗粉の有機膜には多数の小穴が存在する。♀褐色鱗粉では膜は存在せず窓になっている。
- 5) リッジ・クロスリブとその下の有機膜の部分は、鱗粉基板の上に柱に支えられるように乗っており、その間は中空になっている。

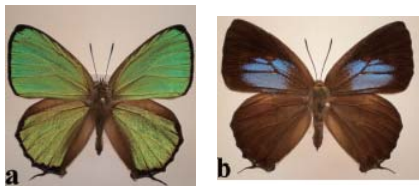


図 4-1. キリシマミドリシジミ
a : ♂ b : ♀

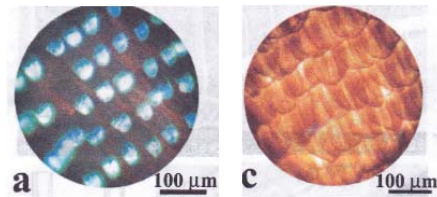


図 4-2. キリシマミドリシジミ♂表面の光学顕微鏡写真 a : 反射光、b : 透過光

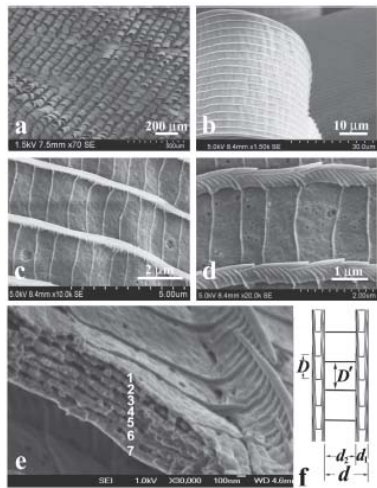


図 4-3. キリシマミドリシジミ♂表面青緑鱗粉の SEM 観察像

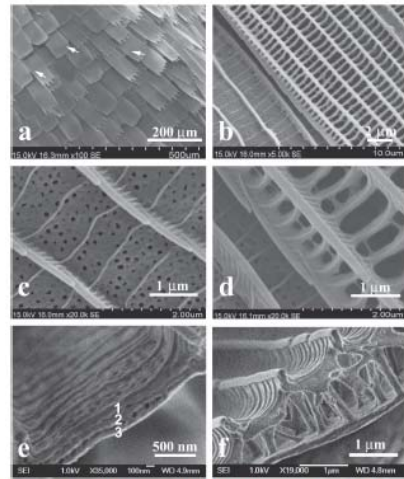


図 4-4. キリシマミドリシジミ♀前翅表面の紫鱗粉・褐色鱗粉の SEM 観察像

(注) 図 4-1~ 図 4-4 は参考文献 10) H.TABATA et.al. : OPTICAL REVIEW Vol.3, No.2 (1996) p.139 より引用

以上のことより、キリシマミドリシジミの着色メカニズムは次のように考えられている。

・リッジ幅及びリッジ幅/リッジ間隔が小さいことから、リッジ自体は着色の原因ではなく、またフォトニック結晶のような構造色も示さない。

・♂青緑色鱗粉と♀紫色鱗粉の発色は、リッジとクロスリブに囲まれた領域底に存在する多層膜反射による。ただし、多層膜のうち空気層の厚さにはバラツキがあることから、結局、数層の単層膜からの非干渉性反射になると考えられる（反射強度は各単層膜からの単純な和になる）。

・反射は特に鱗粉先端のカールした部分で起こる。これにより、♂の輝きの反射方向による違いが説明される。

・♀紫部鱗粉のリッジ・クロスリブ間の有機膜に存在する多数の小穴は、反射光の拡散に寄与するものと考えられる。これにより、♀の紫斑紋は♂の青緑色のように反射の方向依存性を示さない。

♀の褐色鱗粉では、光はリッジとクロスリブに囲まれた窓により透過しその下のメラニン色素によりほとんど吸収されるため反射率は極めて低く褐色に見える。色素で吸収された光は熱にかわり、蝶の活動（特に産卵活動）のエネルギーになる。

今回観察したウラジロミドリシジミ、ミドリシジミについても上記と類似の着色メカニズムと考えられる。その内、2)と3)については確認できた。また、リッジ間の有機膜の存在も SEM 写真から推測することができる。しかし、リッジの詳細な構造や有機膜表面の詳細な構造は高倍率での画像の不鮮明さにより観察することはできなかった。また、翅の色やその発色の方向依存性をなどを詳細に調べるためには、鱗粉の断面構造の観察が不可欠である。

日本産ゼフィルス 25 種の翅は種により白、赤、黄、緑、青、紫、黒など多彩な色彩の翅を持っている。SEM によるこれらの鱗粉の構造観察からその発色メカニズムを解明することができ、その結果をもとにこれらの種の分化・進化していった経緯や種の生存戦略についての知見を得る情報になると考えられる。また、種々の色彩の製品開発にも有用な情報となると思われる。

5. 謝辞

鳥大の走査電子顕微鏡を使用を許可いただき、実際の観察を行ってくださった、鳥取大医学部) 稲賀すみれ先生、および日程調整等でご苦労いただいた米子高専) 浦木勇先生に深く感謝いたします。

6. 参考文献

- 1) 本田計一 加藤義臣 [編]: “チョウの生物学” 東京大学出版会 (
- 2) 木下修一: “モルフォチョウの碧い輝き” 化学同人 (
- 3) 吉岡伸也: 比較生理化学 Vol.25, No.3 (2008) p.86
- 4) 木下修一 他: 生産と技術 第 52 巻 第 2 号 (2000) p.15
- 5) 木下修一 吉岡伸也: SENI GAKKAISHI(繊維と工業) Vol.59, No.2 (2003) p.35
- 6) 山田純: J. HTSJ Vol.47, No.201 (2008)
- 7) 木下修一 他: 色材 75[10] (2002) p.493
- 8) H.TABATA et.al.: OPTICAL REVIEW Vol.3, No.2 (1996) p.139
- 9) M.Imafuku et.al.: Zool. Sci. 19 (2002) p.175
- 10) J.Matejkova-Plskova et.al.: Materials Transactions, Vol.52, No.3 (2011) p.297
- 11) Bodo D. Wilts et.al.: J.R.Soc.Interface, 6 (2009) S185
- 12) “SEM と友だちになろう” (株) 日立ハイテクノロジーズ (2015.12)
- 13) 猪又敏男 「原色蝶類検索図鑑」 北隆館 (1990)