

蝶翅鱗粉による光の回折現象

中村 隆* ・ 廣部 紘輝** ・ 松田 豊稔***

Diffraction Phenomena at Wing-Scales of Morpho Butterflies

Takashi NAKAMURA

Kohki HIROBE

Toyonori MATSUDA

Abstract – Morpho butterflies that live in South America have brilliant blue color on their wings. That color is known as “structural color” and it doesn’t have coloring materials such as pigments. Structural color of Morpho butterflies is considered as the result of complex optical phenomena in wing-scales in which peculiar micro structures exist. By SEM observations of wing-scales, it is found that micro structures have two significant features; (1) the multilayer structures in thickness and (2) the periodic structures in transverse direction. Brilliant blue color of Morpho butterflies is caused mainly by the multilayer structures, but the role of the periodic structures is not elucidated sufficiently. The periodic structure is considered to be a diffraction grating from optical point of view. The purpose of this paper is to analyze the diffraction phenomena that caused by wing-scales.

Key Words : Structural color, Wing-scales, Morpho, Micro structure.

1. はじめに

南米原産のモルフォ蝶は自然光の下で観察すると鮮やかな光沢のある青を発色する[1-3]。この青は色素による発色ではなく、微細な構造による発色であり、構造色と呼ばれる。構造色は昆虫、魚類、鳥類、植物など自然界のさまざまな生物が有している。微細な構造によりさまざまな色を作り出すことは、工業において大きな影響をもたらす可能性がある。例えば、色素を用いた染色作業による水質汚染の減少、塗装、化粧品、装飾品などの複雑な色彩を単一物質で構成するなど、さまざまな応用が考えられる。

本論文ではモルフォ蝶の一種であるキプリス(Cypris)のオスの蝶翅の周期構造に注目して、蝶翅の構造色への周期構造の関与を実験的に解析し、現象を解明することを目的とする。

2. 蝶翅の構造

実験に用いた蝶翅の表面、裏面の全体像を図1に示す。グレースケールのため判然としないが、表面の暗

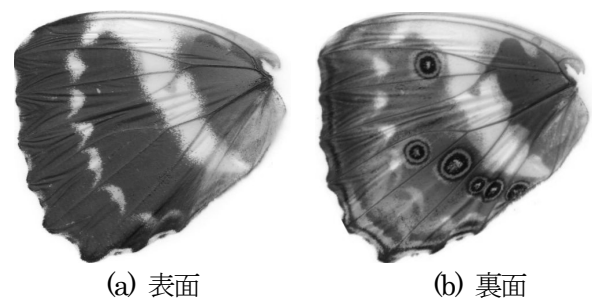


図1 Cypris (オス) 蝶翅

い部分が青の発色であり、裏面の暗い部分は褐色である。表面、裏面の紋様は生物学的な興味の問題であるためここでは紋様の関与は考えない。

2.1. 蝶翅表面の観察

図2に蝶翅表面の青、白の発色部分の電子顕微鏡(SEM)観察の結果を示す。青の表面の鱗粉1枚の大きさは $160[\mu\text{m}] \times 80[\mu\text{m}]$ 程度であり、図のように規則的に配置されている。白の部分の鱗粉の形状と配置は青のそれと変わりはない。図より鱗粉の配置は隣り合った鱗粉同士が規則的な重なり合いをしていることがわかる。短方向の重なり合いは半周期程度の位相のずれを持つような回折格子構造になっている。鱗粉配列の回折格子の構造により回折現象が起こると推測される。しかし、格子定数は $1[\text{mm}]/160[\mu\text{m}] = 6.25$ となり、回折角は非常に小さい。

*釧路高専電子工学科

**釧路高専専攻科電子情報システム工学専攻

***熊本電波高専情報通信工学科

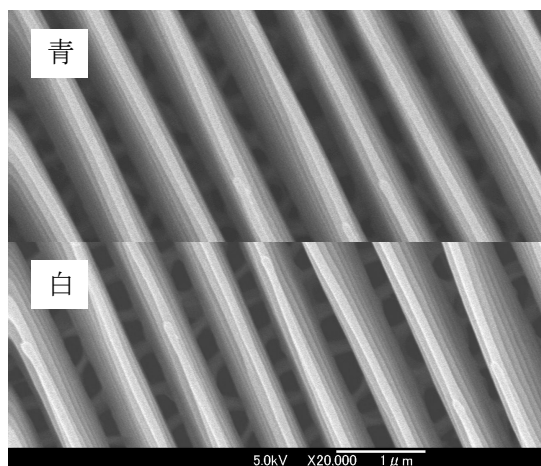


図3 鱗粉のridge構造

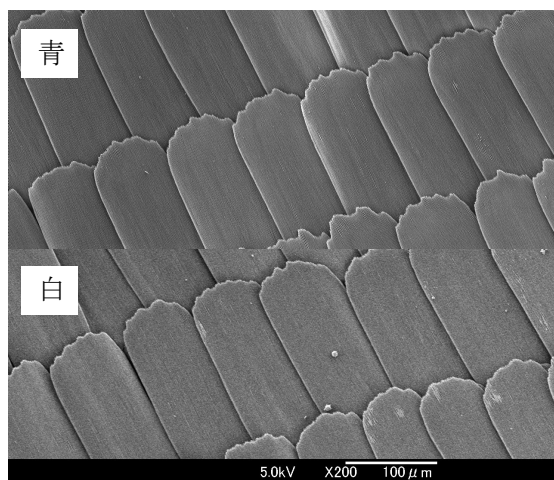


図2 蝶翅表面の鱗粉配列

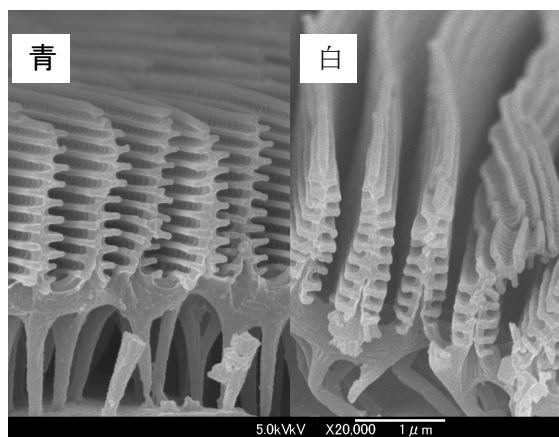


図4 鱗粉のlamella構造

図3に拡大した鱗粉1枚のSEM観察結果を示す。鱗粉の長方向に平行な筋状の構造はridgeと呼ばれる。このridgeの間隔は約630[nm]であり、格子定数は $1[\text{mm}]/630[\text{nm}] \cong 1600$ である。そのため、このridge構造が1次元回折格子として考えられる。

この回折現象により青の発色が起こるとは説明できない。青、白共に鱗粉の配列、ridge構造はほぼ等しいためである。そこで、ridgeの断面をSEMにより

観察した。図4にridge断面のSEM観察結果を示す。奥行き方向に伸びている1次元構造がridgeであり、左右に張り出しを持つフィン状の構造はlamellaと呼ばれている。このlamellaが多層膜構造を形成しており、蝶翅が青を発色する主要因となっている[4,5]。図よりlamellaの厚さは80[μm]、間の空気層は120[μm]の関係があり、左右非対称であることがわかる。lamellaの材質はクチクラで、その屈折率は1.56であることを考えると、 $\lambda/4$ 多層膜反射フィルタの特徴である

$$80 \times 1.56 \div 120 \times 1.0 = 120 = \lambda/4$$

を満たしておりlamellaの積層構造は480[nm]を中心波長とする多層膜反射フィルタの変形であると考えることができる[6,7]。青のlamellaと白のlamellaを比べると、構造自体の違いは見られない。しかし、白のlamellaは $\lambda/4$ 条件からのずれが大きい。また、青に比べてlamellaの成長が不十分であることがわかる。

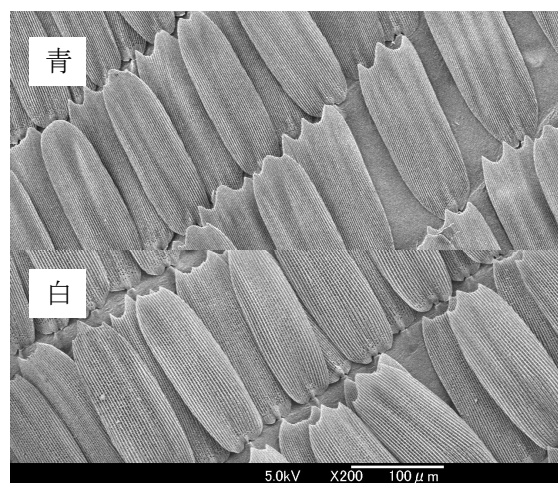


図5 蝶翅裏面の鱗粉配列

2.2. 蝶翅裏面の観察

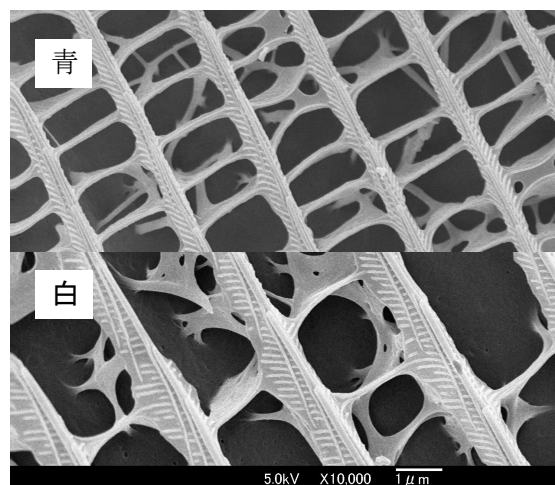


図6 蝶翅裏面のridge構造

蝶翅の裏面は表面のような構造色の発色はない。しかし、固有の紋様を持っているので SEM 観察を行った。裏面の鱗粉の配列を図5に示す。裏面の鱗粉は表面の鱗粉のように規則的に配列している。表面の色が青と白の部分でわずかながら鱗粉の形状が異なる。また、表面の鱗粉の重なり方とは異なる重なり方をして

いる。
図6に ridge 構造を示す。裏面は表面とは大きく異なり、ridge が未発達である。隣り合う ridge の平均間隔は青の部分は $2.1[\mu\text{m}]$ 、白の部分は $2.7[\mu\text{m}]$ である。

3. 回折実験

蝶翅鱗粉は ridge による1次元回折格子、鱗粉の配列による2次元回折格子という2重の回折格子構造を持つことが確認されている[8]。ここでは、これら回折格子構造を実験的に確認する。

3.1. 実験系

蝶翅の回折現象を明確にするためにレーザ光を用いて回折実験を行った。蝶翅を用いた実験系を図7に、鱗粉単体での実験系を図8に示す。蝶翅はホルダーに固定して縦置きできるため、光学系全体を図7のように一列に設定できるが、鱗粉を用いた時には、鱗粉をガラス板に載せて実験するため、光学系を 90° 曲げる必要がある。

実験系1では反射光の観察は不透明スクリーン screen1 上の光強度を、透過光の観察は半透明スクリーン screen2 上の光強度を透過側斜め方向から撮影した。使用したレーザは Ar⁺レーザである。波長分離はしていないが低出力で使用したため、 $488[\text{nm}]$ の発振が大部分を占める。

3.2. 蝶翅における回折実験

反射回折光の一例を図9に示す。回折格子からの反

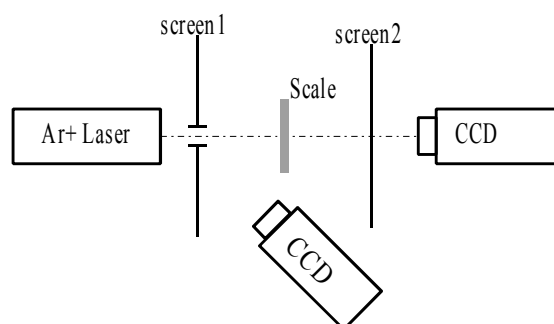


図7 実験系1

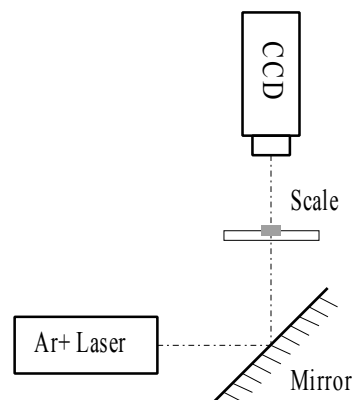


図8 実験系2

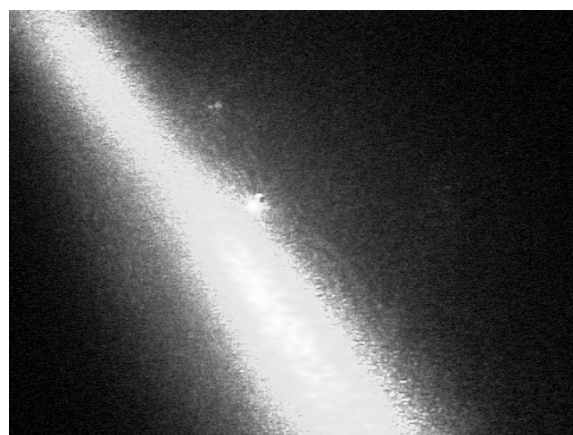


図9 蝶翅表面からの反射光

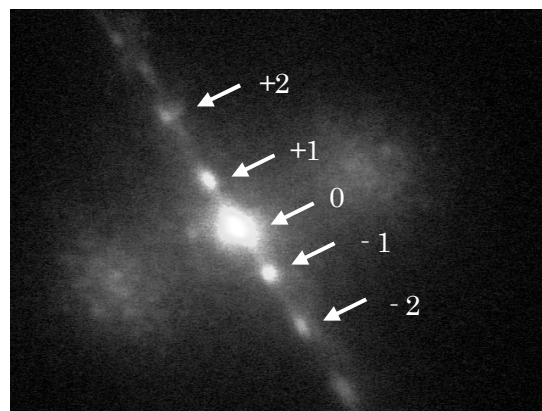


図10 蝶翅からの透過光

射は回折パターンが出現するはずである。しかしながら、図9からわかるとおり反射光は特定の回折パターンが現れていない。蝶翅の SEM 観察においては、鱗粉の配列あるいは ridge 構造から回折格子構造を有していると考えたが反射においては、鱗粉の重なり合いによる数波長以上のランダムな高さの変化、1枚の鱗粉が完全な平面ではなくそれぞれの ridge からランダムな位相を持って反射する、という2つの要素が重なり、回折現象以上に粗面からの反射のランダムな重ねあわせとして、スペックル場が形成されていると考えられる。

透過光の一例を図10に示す。青の部分を照明して回折光を撮影したものである。画面の中心部にある最も強い光強度が0次回折光、左上、右下に1次、2次の回折スポットというきれいな回折パターンが観察できる。この回折パターンの方向は **ridge** 構造の方向に対して直角に形成されているため、この回折パターンは **ridge** 構造を回折格子としたものであることがわかる。照明されている蝶翅から **screen2** までの距離を L 、回折パターン中心の0次光から±1次光までの平均距離を d とすると、 $L = 35[\text{mm}]$ 、 $d = 8[\text{mm}]$ である。これらの値および $\lambda = 488[\text{nm}]$ から鱗粉の回折格子と見たときの回折角 θ および格子間隔 D は

$$\theta = \tan^{-1} \frac{8}{35} \cong 0.2247[\text{rad}]$$

$$D = \frac{\lambda}{n \sin \theta} \cong 2.19[\mu\text{m}]$$

と計算できる。ただし、 $n = 1$ とした。この格子間隔 D は SEM 観察により得られた、表の鱗粉の **ridge** 間隔である $0.63[\mu\text{m}]$ とは大きく異なる。よって、この回折パターンは表面の鱗粉によるものではないと考えられる。他の部分の回折パターンも表面の鱗粉によるものではないことが実験でわかっている。

3.3. 鱗粉単体における回折実験

青の表面の鱗粉の実験結果を図11に、白の表面の鱗粉を図12に、青の裏面の鱗粉を図13、白の裏面の鱗粉を図14にそれぞれ示す。なお、それぞれの図において、中央の円形の暗部は、0次回折光強度が高すぎるためアルミ箔で0次光をカットしたものである。

表面の鱗粉の回折パターンは蝶翅を用いて観察された回折パターンとは異なるものが観察された。青の部分の格子間隔 D は $511[\text{nm}]$ 、白の部分は $686[\text{nm}]$ と算出された。これは SEM 観察で確認された **ridge**

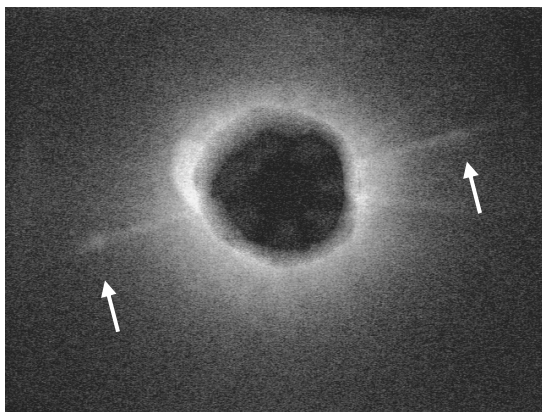


図11 青の表面 $D = 511[\text{nm}]$
間隔に相当する値である。

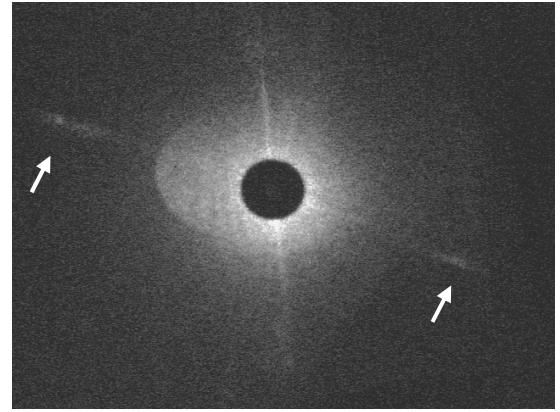


図12 白の表面 $D = 686[\text{nm}]$
裏面の回折パターンは、蝶翅を用いて観察された回

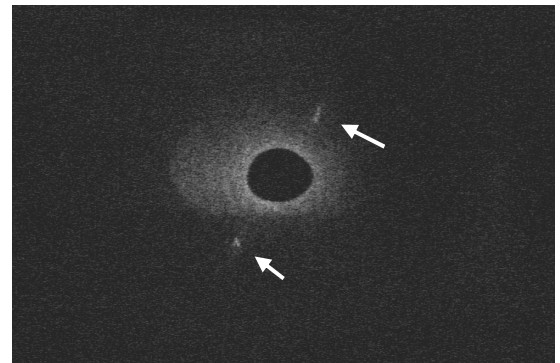


図13 青の裏面 $D = 2.48[\mu\text{m}]$

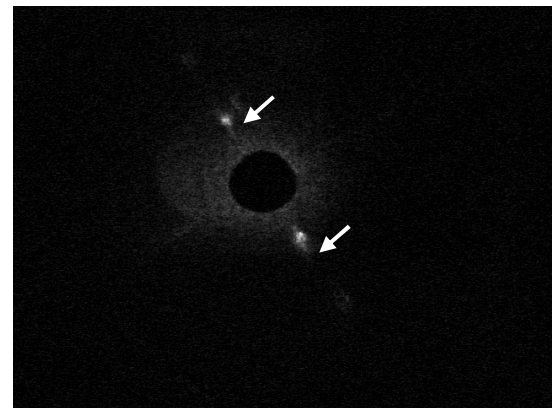


図14 白の裏面 $D = 2.97[\mu\text{m}]$

折パターンとはほぼ等しいことが確認された。すなわち、蝶翅全体を用いた回折実験により得られた格子間隔は裏面の鱗粉の **ridge** 間隔に相当する値である。

表面と裏面の鱗粉の回折パターンを比べると、表面は裏面より光強度が弱いことがわかる。これは表面の鱗粉は実験に用いた Ar^+ レーザからの照明を反射してしまうため透過側の光強度は弱いものになっており観察しにくいと考えられる。

4. まとめ

本論文では蝶翅の青と白の部分の SEM 観察の結果

からそれらの構造的な違いを検討した。次に、Ar⁺レーザを用い回折実験を行った。鱗粉単体に照明し、得られた回折パターンにより、蝶翅自体に照明したときに得られる回折パターンは裏面の **ridge** 構造によるものだということを解明した。回折実験により **ridge** を回折格子と考えるとき、そのピッチが SEM 観察の結果を支持すること確認された。

今後の課題として反射の回折について、さらに検討を加え、構造色に及ぼす影響について解明する。

謝辞 本研究の一部は、平成 16 年度科学研究費補助金基盤(B) (2) (15310079)によるものである。

参考文献

- [1] H. Onslow: *Phil. Trans. Roy. Soc. B*, **211**, 1921, pp.1-74.
- [2] Tabata, H. et al., "Microstructures and optical properties of scales of butterfly wings", *OPT. REV.* **3**, 1996, pp.139-145.
- [3] H. Ghiradella, *Optics & Photonics News* **10**, 1999, pp.46-48.
- [4] J. Huxley: *Proc. Roy. Soc. Lond. B* **193** (Royal Society of London, London, U.K.), 1976, pp.441-453.
- [5] T. Nakamura, T. Matsuda, E. Nishiyama, and H. Itoh: *Proc. of IC0'04 International Conference*, 2004, pp.521-522.
- [6] 中村, 廣部, 伊藤, 松田: *Optics Japan '04 講演予稿集*, 2004, pp.182-183.
- [7] T. Nakamura, T. Matsuda, H. Itoh: *OWLS8 Book of Abstracts*, 2004, pp.121-122.
- [8] 廣部, 松田, 中村: 第1回日本光学会北海道支部学術講演会予稿集, 2004, p.78.