

蝶翅鱗粉の光学特性とフラクタル性

中村 隆* ・ 伊藤 日出男** ・ 松田 豊稔***

Optical Properties of Wing-Scales of Morpho Butterflies and Their Fractality

Takashi NAKAMURA

Hideo ITOH

Toyonori MATSUDA

Abstract – Morpho butterflies have brilliant blue color on their wings. It is well known as “structural color” and is considered as the result of complex optical phenomena in wing-scales. SEM observation of micro structures of wing-scales and computer simulation of spectral reflectance characteristics using equivalent refractive index method is useful tool to evaluate generation mechanism of structural colors. It is shown by this tool that the micro structures of wing-scales are efficient color filter.

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

1. はじめに

南米原産のモルフォ蝶に見られる光沢のある青の発色は、蝶翅自身は色素を持たない構造色として知られている[1-3]。この構造色はモルフォ蝶ばかりではなく、昆虫、魚類、鳥類、植物など、広範に見られる。これらの生物はその進化の過程において種の保存のためにこのような形質を獲得したと考えられるが、工業的観点からは、色素を用いずに発色することは様々な利点がある。特に、繊維の染色工程では色素による水質汚染が常に問題となるが、構造色を利用することができれば、この問題は簡単に解決する。また、単一の材質により微細構造を構成するだけで発色が可能であることは、塗装、装飾、化粧品など、色を基本とする産業に大きな影響を及ぼすと考えられる。

本論文ではモルフォ蝶の一種である *Cypris* (キプリス) のオスの蝶翅を取り上げ、電子顕微鏡観察による構造解明、等価屈折率を用いた光学的特性シミュレーションを主として、その構造色の発色機構について考察を進める。

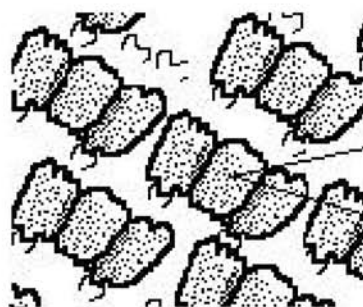


図1：鱗粉表面（青）

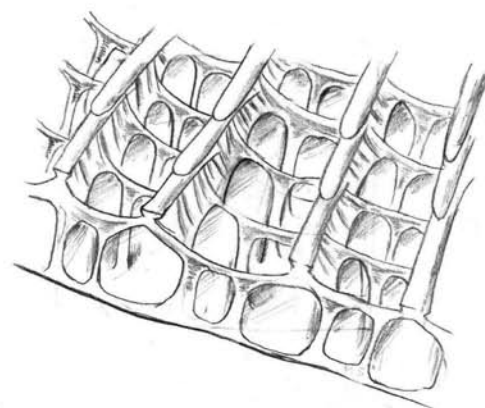


図2：鱗粉構造の拡大

2. 一般的な蝶翅鱗粉の構造

一般的な蝶翅鱗粉は図1に示すように、蝶翅の表面

及び裏面に、鱗粉はその名の通り鱗状に規則的に配置されている。後述するように鱗粉は1枚ずつ socket と呼ばれる構造により、基板に植え付けられた状態にある。鱗粉をさらに拡大観察すると、単なる板ではな

* 釧路高専電子工学科

** Cyber Assist Research Center,AIST Japan

*** 熊本電波高専情報通信工学科

く、図2に示すような複雑な構造をしていることがわかる。表裏どちらの鱗粉も複雑な構造をもつが、構造色と呼ばれる鮮やかな青の発色は表側の鱗粉による光学現象である。鱗粉の長手方向の筋のような構造を ridge, その中に存在する微細な積層構造を lamella とよぶ。構造色の鮮やかな発色はこれら ridge と lamella における光学現象の結果である。

3. 電子顕微鏡観察による蝶翅鱗粉の構造

電子顕微鏡を用いて、蝶翅鱗粉の微細構造観察を詳細に行った。以下、電子顕微鏡写真とその説明を列記する。

3.1. 鱗粉表面

青の部分の表面全体を図3に示す。1枚の鱗粉の大きさは約 $80\mu\text{m} \times 160\mu\text{m}$ である。このような規則的な配列は光学的には2次元回折格子として作用するが、格子ピッチが大きいため、0次光と高次光の分離角は非常に小さい。この鱗粉1枚を拡大すると、縞構造 (ridge) が見えてくる。これを図4に示す。この縞の

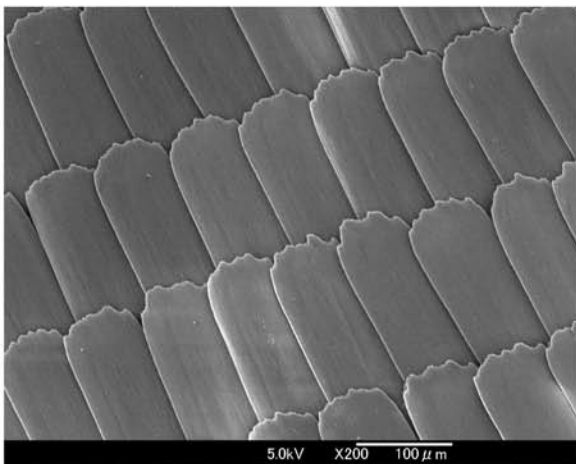


図3：鱗粉表面（青）

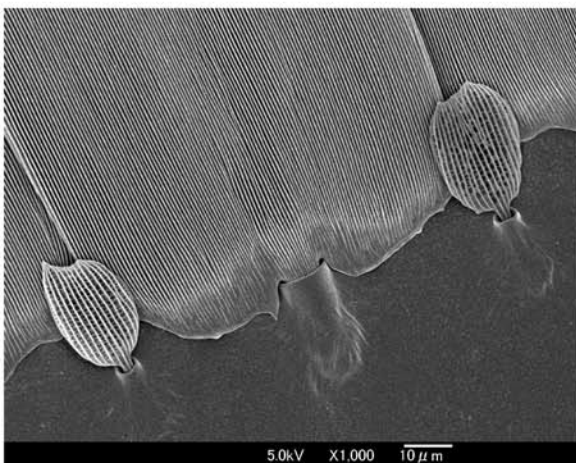


図4：鱗粉表面（青）

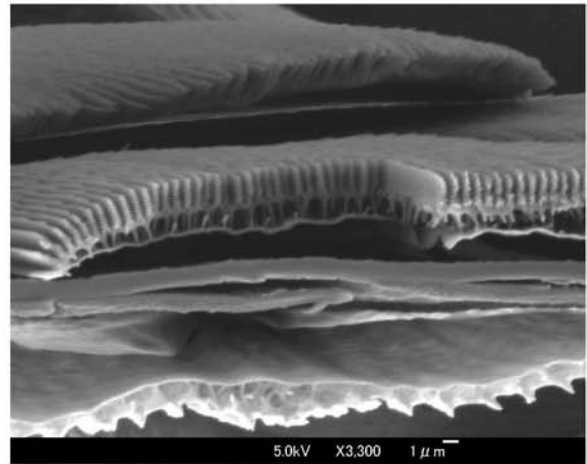


図5：鱗粉断面（青）

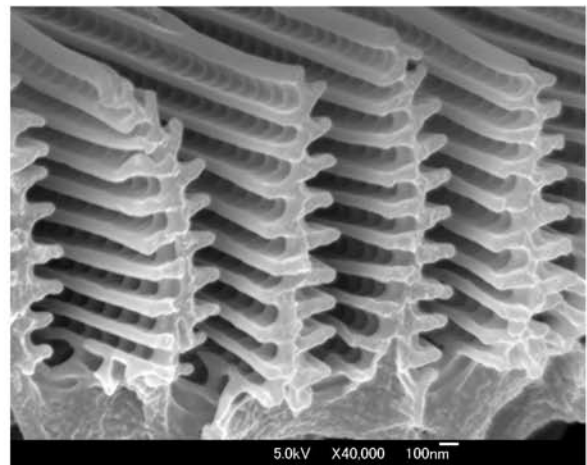


図6：lamella の構造（青）

ピッチは約 $0.6\mu\text{m}$ であり、光学的には1次元回折格子として作用する。また、分離角は10度から20度程度となり、蝶翅を観察する際に視野の微妙な変化に対応して回折光の変化を見ることになる。図の中央部に見えるように、それぞれの鱗粉は socket によって基板構造に植え付けられている。また、鱗粉の重なりが常に一方方向であることは、それぞれの鱗粉が蝶翅という基板に対して一定の角度で並んでいることであり、これも構造色に関係していると考えられる。

3.2. 鱗粉断面

次に、断面構造を図5示す。上から表側鱗粉、基板構造、裏側の鱗粉という3層構造をしている。表側の鱗粉の断面を見ると、1枚の鱗粉は単なる膜ではなく、厚さ方向に複雑な構造 (lamella) を持っていることがわかる。これをさらに拡大すると、図6のような構造が見える。拡大倍率は40000倍である。この多層膜状の横方向の張り出し構造が lamella である。lamella の膜厚は約 80nm 、間の空気層の厚さは約 120nm である。lamella はクチクラ（ケラチン）であり、ほぼ屈折率1.5である。さらに、Cypris 蝶翅の構造色を示す部分の鱗粉ではメラニン色素が存在せず、ほぼ無色

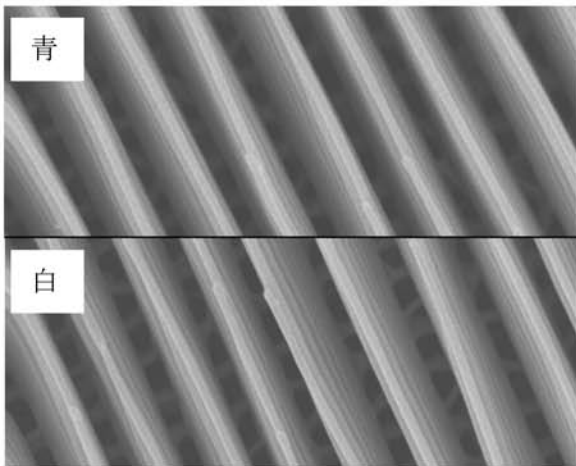


図7：表面色による ridge 構造の違い

透明と考えられる。lamella のこの色素の存在しない多層膜構造が構造色の主要因と考えられる[4]。

3.3. 青色部分と白色部分の比較

Cypris は蝶翅全体がー様な青ではなく、青色と白色による紋様を構成している。どちらの部分も同じような鱗粉の微細構造をもっている。これらの違いを鱗粉の構造から比較する。図7にridge構造の違いを示す。上半分が青色の部分、下半分が白色の部分の鱗粉を20000倍で観察した結果の比較である。わずかではあるが、白の鱗粉の ridge 間隔が狭いことがわかる。次に、lamella の比較を図8に示す。lamella の「発達」の程度が青の部分のほうが高い様子が見られる。青の部分では最上部を除いてほぼ一定の幅を持った lamella の多層構造が見られるが、白の部分では、低部から上部に向かって lamella の幅が次第に狭くなっていく様子と、lamella と空気層の厚さの比も青の部分とは異なる様子がみられる。

3.4. 蝶翅裏側の鱗粉

図5からわかるように、蝶翅裏側にも鱗粉がある。裏側は表側のような構造色は見られないが、表側とは異なる白色と茶色の紋様を持つ。これら裏側の鱗粉が

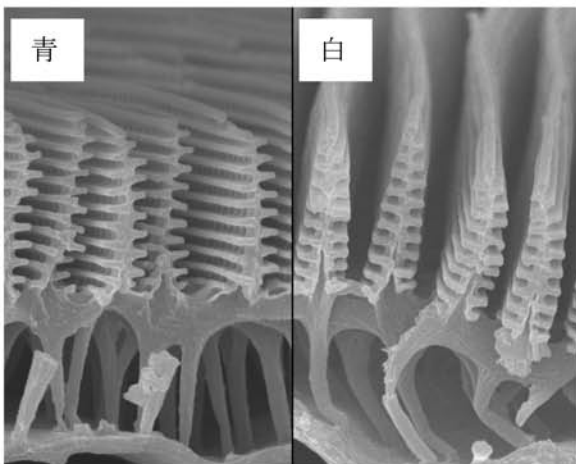


図8：表面色による lamella 構造の違い

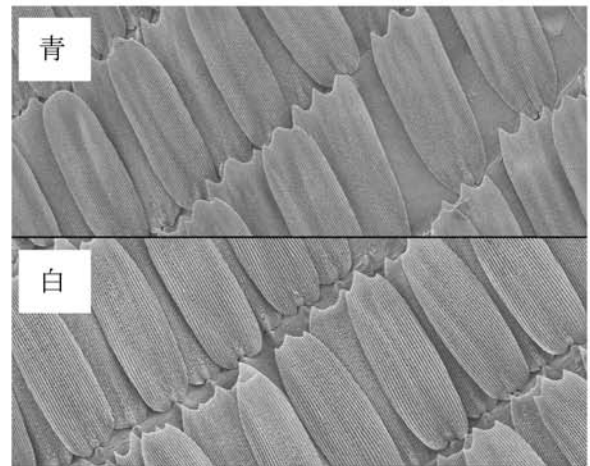


図9：蝶翅裏側の鱗粉の配列

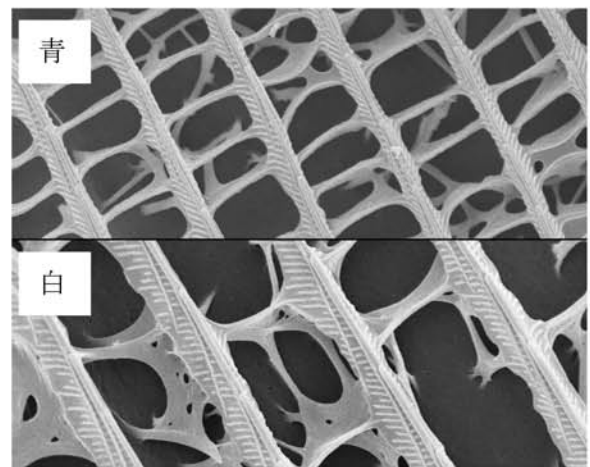


図10：蝶翅裏側の鱗粉の ridge 構造の比較

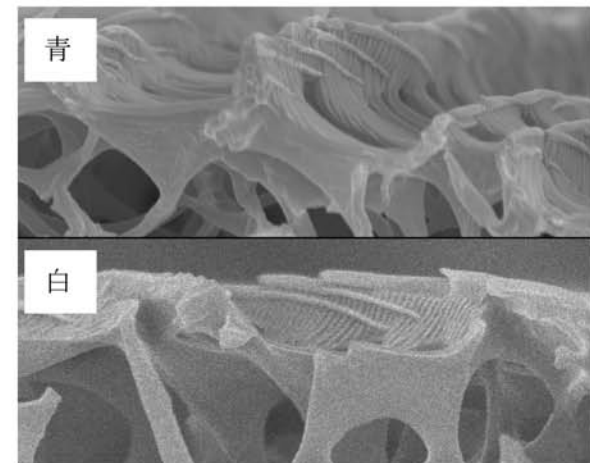


図11：蝶翅裏側の鱗粉の lamella 構造の比較

構造色に直接影響しているかどうかは明確ではないが、これらについて考察しておくことは重要である。青の部分と白の部分の裏側を比較していく。まず、鱗粉の配列の様子をみたものを図9に示す。形状にわずかな違いは見えるが、大きさには違いは見えない。次に、それぞれを拡大して、ridge 構造を10000倍で比較したものを図10に示す。図から明らかに ridge 間隔が異なっていることがわかる。青の裏面では ridge 間隔は

約 $2\mu\text{m}$, 白の裏面では約 $2.8\mu\text{m}$ である。次に, lamella の形状比較を図 11 に示す。倍率は 20000 倍である。裏面の鱗粉では, 表面の青, 白によらず, 明らかに lamella の構造が十分には発達しておらず, 構造色となるような図 6 あるいは図 8 に対応する lamella の微細構造が観察されない。裏側の鱗粉において lamella が十分に発達せず, ridge のみが強調されて見えるということは, 裏側の鱗粉からの光の回折において違いが現れること, 構造色への影響が少ないことが推測される。裏側の鱗粉の白色と茶色の紋様は鱗粉に含まれるメラニン色素によるものと考えられている。

3.5. 構造のフラクタル性

これまでに見た蝶翅鱗粉の構造について, 自己相似性という幾何学的な意味での完全なフラクタル性を見出すことはできない。しかし, 鱗粉配列, 鱗粉中の ridge 配列, ridge に存在する lamella 構造, さらに, ここでは紹介していないが, lamella の層間に存在するもう一つの構造である sub-lamella 構造と, 次第に減少する尺度の中で幾何学的構造が連続している。これらが鱗粉の光学特性に対してどのように影響しているかについては, さらに検討が必要である。

4. シミュレーションによる解析

ここでは, 表側の鱗粉のもつ微細構造を対象として, 多層膜計算による分光特性シミュレーションを行い,

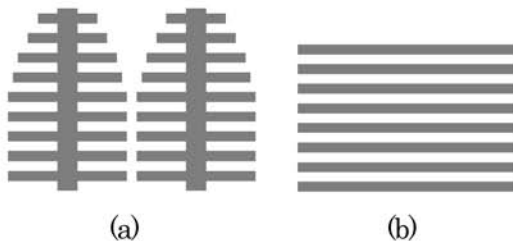


図 12: lamella 構造のモデル化

灰色部分が誘電体, 白が空気層を示す。それぞれの層の厚さはSEM観察写真より得られる。

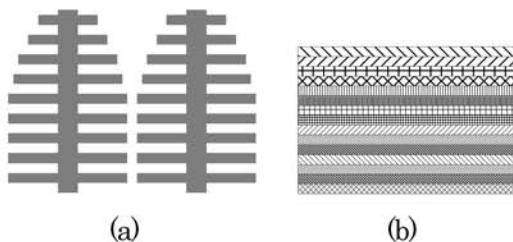


図 13: 等価屈折率の考え方

(a)の灰色(誘電体)と白の空間の割合により等価屈折率が各層ごとに計算される。

構造色発生について考察する。

4.1. クチクラ・空気層の近似

図 6 に示した lamella の微細構造を元に幾何学的にモデル化したものを図 12(a)に示す。SEM 観察の結果では, lamella の左右の張り出しは交互に現れる非対称構造であるが, 計算の簡単化のため, 対称構造でモデル化した。ここでは lamella を構成する材質は屈折率 1.5 で分散性のない様な誘電体として考える。この構造は図 12(b)に示すような, 誘電体と空気による多層膜構造に変形を加えたものと考えることができる。空気を屈折率 1 の誘電体と考えれば, これは明らかに誘電体多層膜フィルタを構成している。図 12(a)と(b)を比較すると, 誘電体膜部分については, 誘電体と空気の 2 つの層から構成されると考えられ, このような場合, この層は誘電体と空気の比により計算される等価屈折率を持つ様な誘電体膜として計算することができる。これを図 13(a)の各層に対して適用すると, 図 13(b)のように, 層ごとに異なる屈折率を持つ多層膜構造に変換できる。等価屈折率は以下の式で計算される[5]。なお, n^s と n^p はそれぞれ s 偏光, p 偏光を, Γ は 1 周期の中での lamella と空気部分の比率を表す。

$$n^s = [\Gamma n_1^2 + (1 - \Gamma) n_2^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

$$n^p = \left[\frac{\Gamma}{n_1^2} + \frac{1 - \Gamma}{n_2^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

等価屈折率の考え方を元に, 図 12(b)の多層膜フィルタを基準として, 図 12(a)の lamella モデルを図 13(b)の等価屈折率近似された多層膜で計算し, 比較した結果を図 14 に示す。使用したパラメータは誘電体屈折率 $n_1 = 1.5$, 厚さ $e_1 = 80[\text{nm}]$, 空気の屈折率 $n_2 = 1.0$, 厚さ $e_2 = 120[\text{nm}]$ である。なお, 採用した繰り返し型の誘電体多層膜フィルタにおいては, 各層の光学的厚さ ($= n_1 e_1 = n_2 e_2 = 120[\text{nm}]$) の 4 倍の波長 ($\lambda_0 = 480[\text{nm}]$) を中心波長とする帯域フ

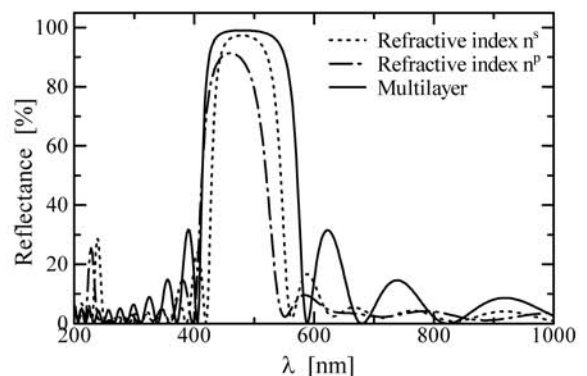


図 14: 反射分光特性

イルタとなることは既知である[6]。lamella をモデル化する際の各層の Γ 値は煩雑になるので省略する。図から、誘電体多層膜フィルタ、lamella モデルいずれにおいても、ごく狭い帯域の波長のみを反射する良好な色選択フィルタの特性を示している。さらに、誘電体多層膜フィルタの分光特性に対して、等価屈折率多層膜では(1)狭帯域化する、(2)副極大値が低下するという、波長選択性が強くなった分光特性が得られたことがわかる。狭帯域化、副極大値の減少は白色光照明下で観察した時に、より単色に近い色彩を観察できることを示している。これはCypris蝶翅の観察において、金属光沢を思わせるような鮮やかな青の構造色に対応する。このような現象はlamella モデルにおいて、先端で誘電体部分が次第に少なくなっていくことに起因する。

4.2. 他の物質による計算

構造色を備えた素材の工業生産を考える場合、異なる屈折率を持つ物質で実現できるかどうかのシミュレーションを行うことは重要である。ここでは、半導体プロセスを利用した lamella モデルの実現を考慮し、また構成物質による2次的な効果を考え、 SiO_2 と TiO_2 による多層膜構造を取り上げる。 TiO_2 を用いることは、構造色を備えた素材がさらに光触媒効果をもたらすことをねらっている。

SiO_2 、 TiO_2 の屈折率は可視光帯域でそれぞれ1.4618, 2.3487 程度である。これを元に光学的厚さを考慮し、

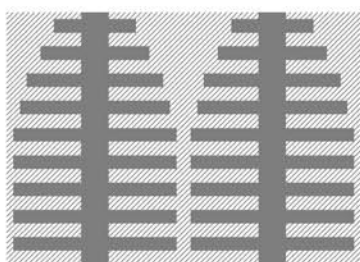


図 15 : $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 多層膜による lamella モデル

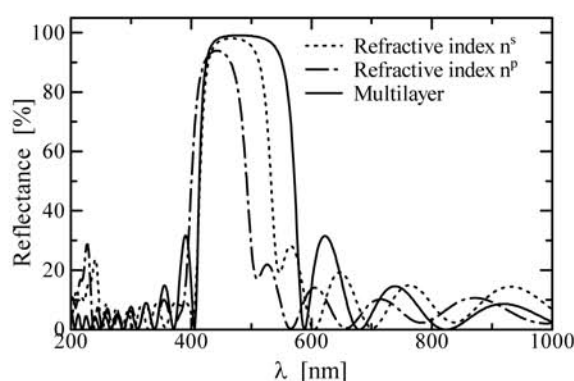


図 16 : $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 多層膜の分光反射特性

図 15 に示すように、lamella 構造を TiO_2 、その他の空間を SiO_2 で埋めるような構造を考える。このような構造について前節と同様に等価多層膜を用いた分光反射特性の計算を行った結果を図 16 に示す。図 14 と比較して短波長側へのシフトが大きいこと、副極大の振る舞いが多少異なっていることが見られるが、狭帯域化され、構造色を備えた素材としての実現が期待できる。

5. まとめ

本論文では、南米原産のモルフォ蝶の一種である Cypris のオスの蝶翅を取り上げ、電子顕微鏡観察による物理的構造の解明、等価屈折率多層膜モデルによる分光反射率のシミュレーションを行った。結果として、蝶翅表側鱗粉の持つ複雑な微細構造が構造色に寄与していることを示した。また、工業的生産を考慮したモデル計算を行い、半導体プロセスを利用した微細構造の作製により分光反射率特性が蝶翅鱗粉に近い特性を持つことを示した。

しかし、色の「見え」という感覚的な量は、これまで行ってきた分光反射率だけではとらえきれない点がある。今後は実際に微細構造を作製し、測色による評価と分光反射率の測定を行うこと、大量生産を考慮した素材、作製方法の追及が課題である。

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] 松田 : 熊本技術フォーラム (2003)
- [6] M. Born and E. Wolf : *Principles of Optics* (Fifth Edition), pp.347-348, Pergamon Press(1975).