



Title	ナミハンミヨウの特異な構造色の発色原理解明
Author(s)	
Citation	令和4（2022）年度学部学生による自主研究奨励事業 研究成果報告書．2023
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/90987
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

令和4年度大阪大学未来基金「学部学生による自主研究奨励事業」研究成果報告書

ふりがな氏名	いとうかずま 伊藤和真	学部 学科	工学部 応用自然科学科	学年	3 年
ふりがな 共同 研究者氏名		学部 学科		学年	年
					年
					年
アドバイザー教員 氏名	齋藤彰	所属	工学研究科 物理学系専攻 精密工学コース 原子制御プロセス領域		
研究課題名	ナミハンミョウの特異な構造色の発色原理解明				
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。(先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。)				

1. 研究背景、目的

構造色は、微細構造に起因する干渉・回折・散乱等の物理現象に基づく色素によらない色である。構造色は色素発色とは異なり、光の物理的作用による発色のため、エネルギー損失がなく、半永久的に色褪せず、重金属の原料を用いない環境に優しい色といえる。そのためか、自然界には構造色を用いた色彩があふれ、代表例ではモルフォ蝶など、色素には見られない独特の美しい色をもっている。したがって、構造色は応用上のポテンシャルも大きい。

ナミハンミョウはハンミョウ科に属する一種で、前翅に赤、白、紺、緑と様々な色を持つとともに、前翅（背）と腹側で光沢の有無が異なるなど、多くの興味深い性質を有する（図1）。構造色を示すハンミョウは他にも知られ古くから研究されているが、これらは1、2色のものが多く、また光沢の有無などは詳細に知られていない^[1]。そこで本研究では、ナミハンミョウの発色（特に多色性）や光沢感がどのような微細構造に起因するか、解明を目指す。

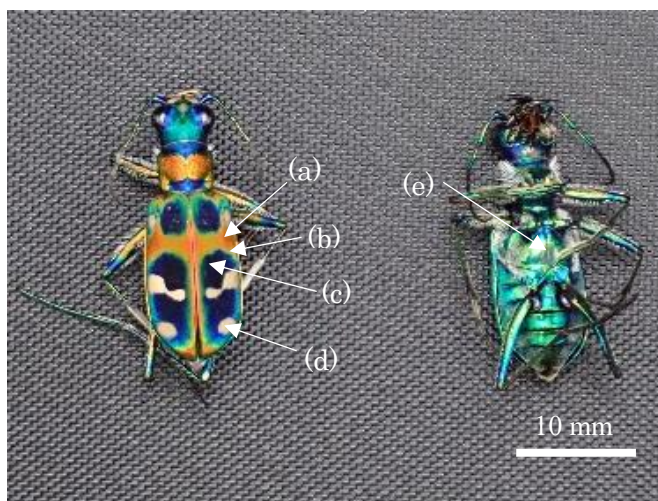


図1 ナミハンミョウ全体像

(a)前翅赤色部、(b)前翅緑色部、(c)前翅紺色部
(d)前翅白色部、(e)腹側（正確には後胸腹板であるが、以後わかり易さのため「腹側」と称する）

2. 研究計画・方法

・光学評価

本種の前翅・腹側におけるスペクトルの角度依存性を調べた。図 2 のセットアップに示す通り、コリメート化した白色光を試料に入射し、分光器につないだ光ファイバを角度走査することで、反射スペクトルの角度依存性を調べた(Olympus 社による特注システム)。

また本種の前翅・腹側における反射スペクトルを分光光度計で測定した(日本分光社・V-650)。

・構造評価

- 1) 光学顕微鏡(KEYENCE 社・VHX500)により、本種前翅の 4 色(赤、緑、紺、白)部分および腹側の表面構造を調べた。
- 2) 次に走査型電子顕微鏡(SEM)観察を行った(日立・S-4800)。観察にあたり、試料は標本から該当部位を切片として切り出し、オスミウム蒸着(5 nm 程度・真空デバイス社・HPC-30)による導電処理を行った。観察は試料の表面構造、および断面構造について行った。
- 3) 次に 4 色(赤、緑、紺、白)部断面構造について、透過型電子顕微鏡(TEM)観察を行った(日立・H-7000、H-7500)。なお生物試料のため、TEM 前に該当部位を切り出した試料に対し、固定(グルタルアルデヒド、四酸化オスミウム)、洗浄、脱水、樹脂による包埋処理、ミクロトームによる薄片化、染色処理(酢酸ウラン)を施した。

・発色特性と構造色起源の検討

- 1) 上記の光学測定と構造評価の結果を比較して、構造色の起源を検討した。特に前翅 4 色部の相違が、微細構造とどう関連するか、仮説とモデルの構築を行った。
- 2) 上記構造モデルの妥当性について、構造データの考察をもとに簡略化した 2 次元数値モデリングを行い、シミュレーションで評価した。手法は数値計算法、具体的には FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法を使用し、反射スペクトル及びその角度依存性につき、実測値と比較した。FDTD 法は、空間をメッシュで細分化して Maxwell 方程式を差分計算するため、本種で観察される微細な凹凸や突起など、解析的に計算が困難な対象を計算できる点が特筆される。ソフトウェアは一般性と確実性を担保するため、市販パッケージを用いた(Ansys Lumerical FDTD, Ansys Canada Ltd.)。

3. 研究成果および考察

3-1) 前翅と腹側の光沢感が違う要因

標記の疑問について、前翅赤色部と腹側の反射スペクトルの角度分布を調べた (図 3)。

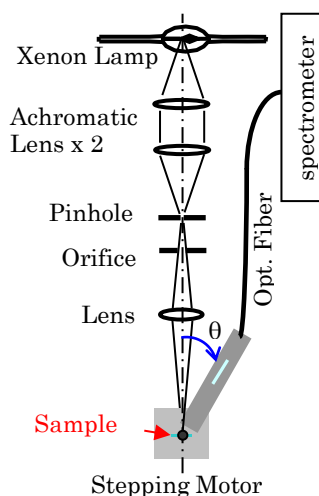
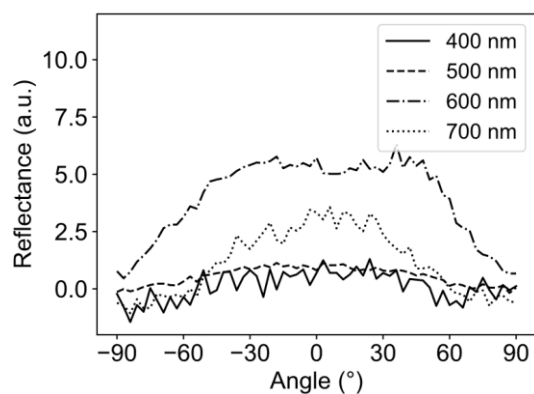
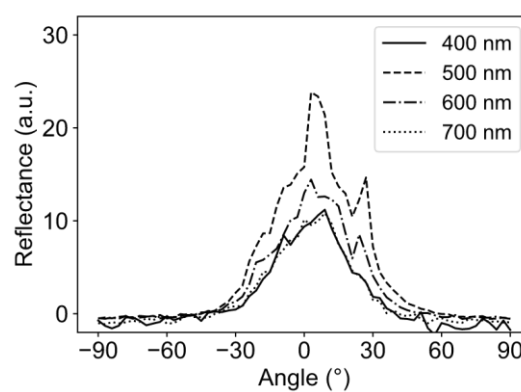


図 2 ファイバの角度走査と分光器による反射率測定



(a) 前翅赤色部

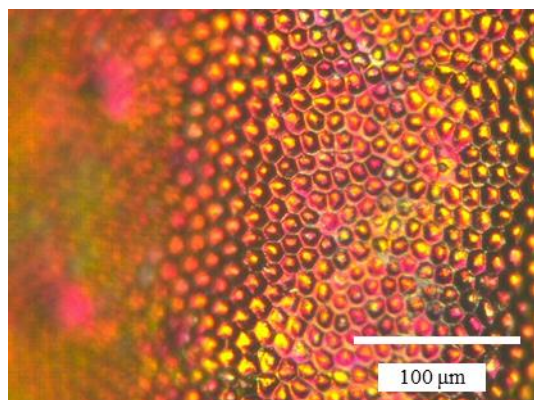


(b) 腹側

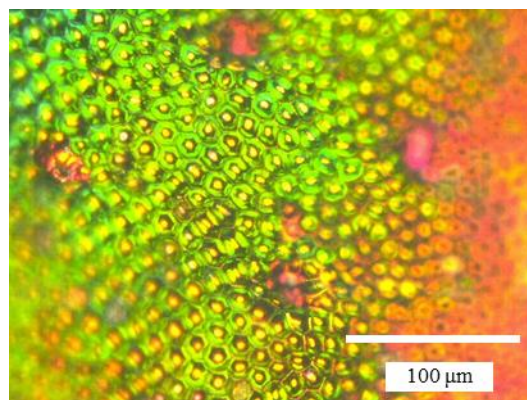
図 3 本種前翅赤色部、腹側における反射スペクトルの角度分布

図 3(a)より、前翅赤色部は、反射光を広範に拡散しており角度依存性が低いことが分かる。一方、図 3(b)より、腹側の反射光は角度広がり小さく鏡面反射に近いため、前翅赤色部に比べ角度依存性が高い。以上の結果は、前翅では光沢が見られない一方、腹側では光沢が確認できることと一致する。この結果は前翅と腹側で表面構造が異なることを示唆する。

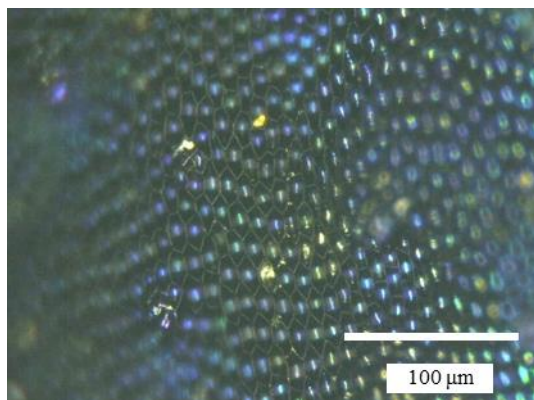
そこで、両者の光沢感の違いがいかなる表面構造に起因するか調べるために、光学顕微鏡で表面構造を調べた（図 4）。



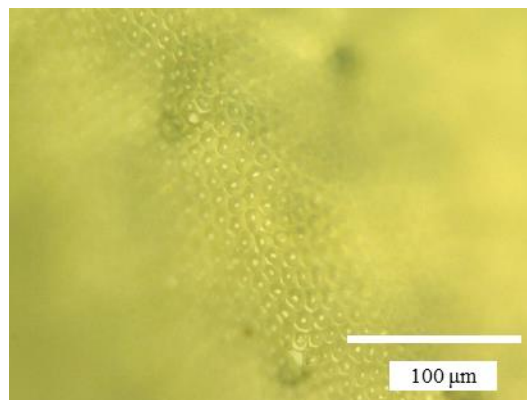
(a) 前翅赤色部



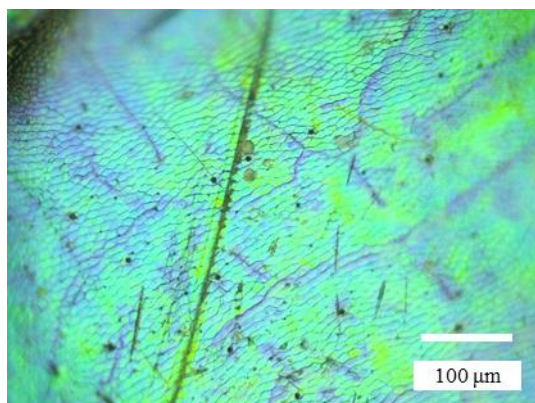
(b) 前翅緑色部



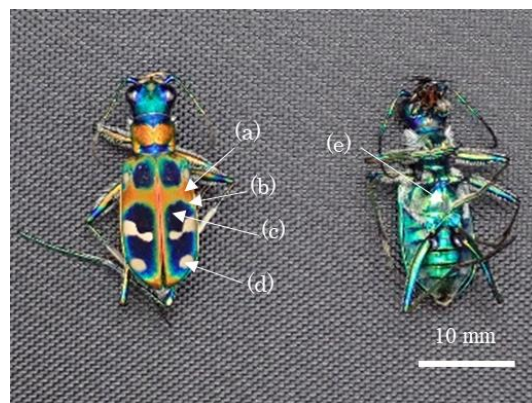
(c) 前翅紺色部



(d) 前翅白色部



(e) 腹側



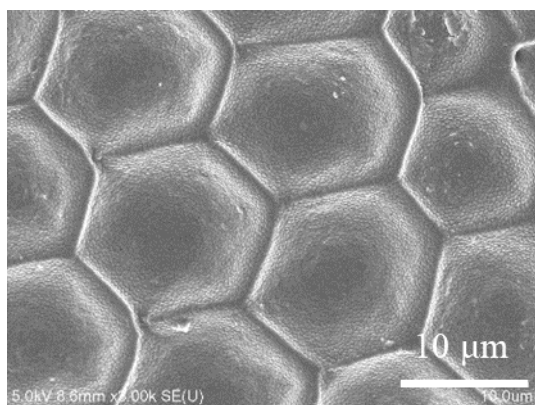
(f) 全体図 (図 1 を再掲)

図 4 本種前翅 4 色部および腹側の表面構造

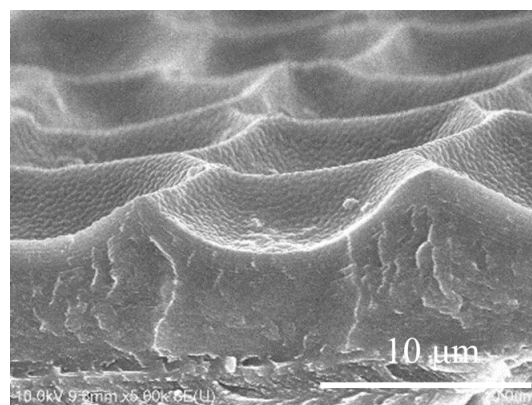
図 4(a-d)より、本種前翅では、4 色の部位いずれも、先行研究で指摘された六角形凹み構造が確認でき^[1]、色によって表面構造に大きな違いは見られなかった。一方図 4(e)より、腹側には前翅に見られた六角形凹み構造が見られず比較的平坦な構造をしていた。

図 3、4 の結果より、前翅には光沢がなく腹側に強い金属光沢が確認できたのは、凹み構造の有無によると推測できる。つまり、前翅では凹み構造による反射光の散乱が低い角度依存性 (図 3(a)) と光沢消滅をもたらし、凹みのない腹側では散乱が少なく正反射光の比率が高くなり、強い金属光沢が生じたと考えられる。

そこで、前翅の光沢感消滅に寄与したと推測される凹み構造をさらに精査するため、前翅赤色部の表面、および断面構造の SEM 観察を行った (図 5)。その結果、光学顕微鏡観察 (図 4) と同様に、表面には六角形凹み構造が確認でき、その断面には楕円の下半分を切り取ったような窪みが確認できた。



(a) 表面構造

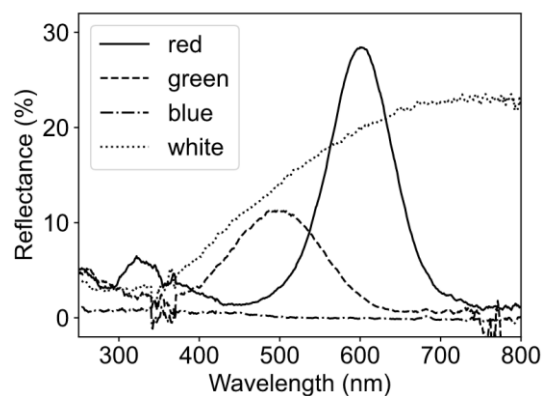


(b) 断面構造

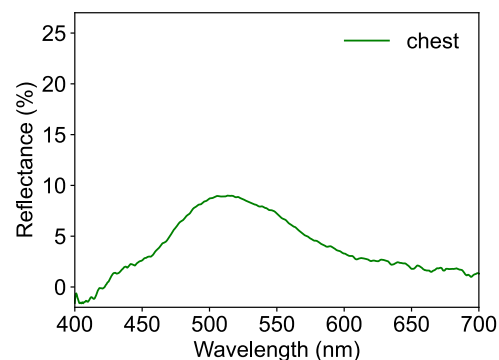
図 5 前翅赤色部の SEM 観察

3-2) 前翅 4 色部における色の起源について

まず、前翅 4 色部および腹側の計 5 か所について、目視による色と反射スペクトルのピークが一致しているか調べるために、反射スペクトルを調べた (図 6)。



(a) 前翅 4 色部

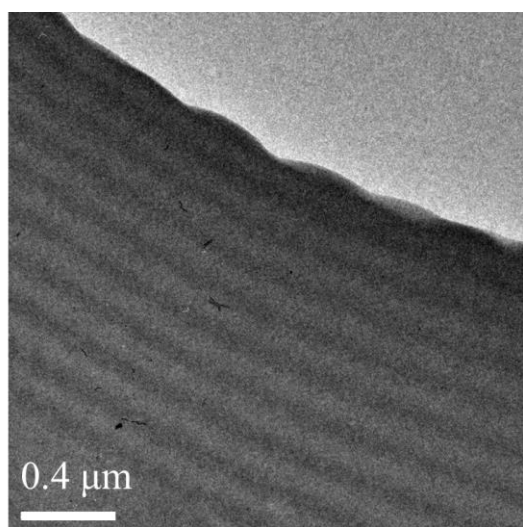


(b) 腹側

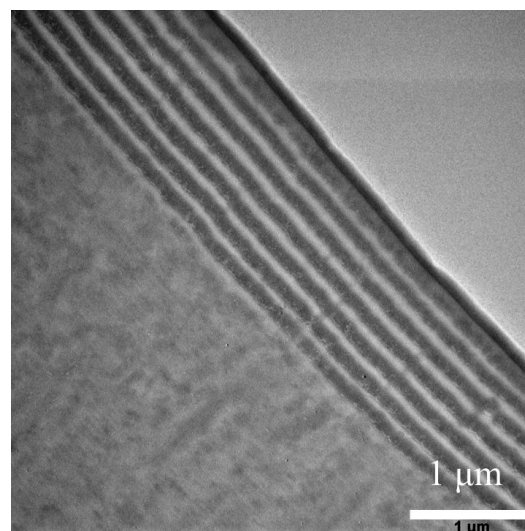
図 6 本種前翅、腹側における反射スペクトル

図 6(a)より、赤、緑部領域の反射スペクトルのピークはそれぞれ 600 nm、500 nm 付近にあり、目視による色と実測スペクトルが一致している。また、白色部は 400 nm ~ 800 nm にかけて反射スペクトルがなだらかに続いており、これも目視による色と実測スペクトルが一致している。ただ、紺色部のスペクトルで反射率はほぼ 0 %、400 nm 近傍で 1 %程度であり、ほぼすべての可視光を反射していないことが分かった。また、図 6(b)より腹側の反射スペクトルは 520 nm 付近にあるため、これも目視で緑色に見えていることと一致する。

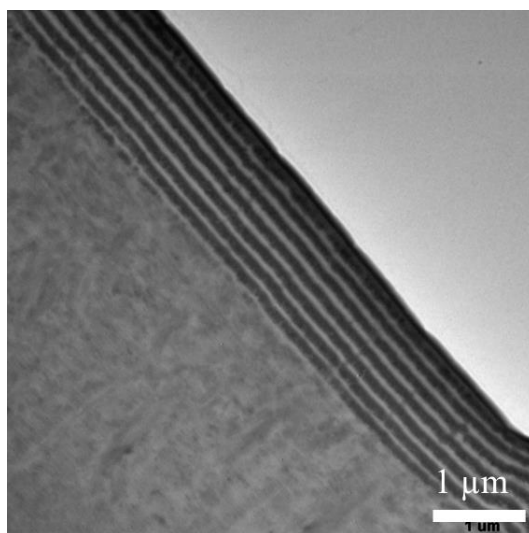
そこで、色の起源である。前翅の色の違いは、先行研究でも示唆されていた多層膜構造に原因があると考え^[1]、前翅 4 色部の断面構造を TEM で調べた (図 7)。



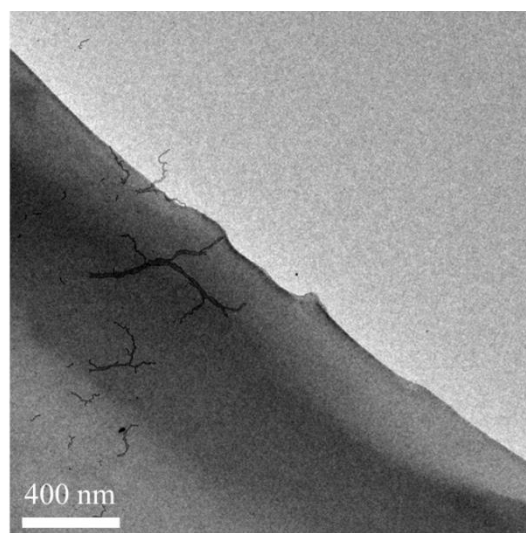
(a) 前翅赤色部



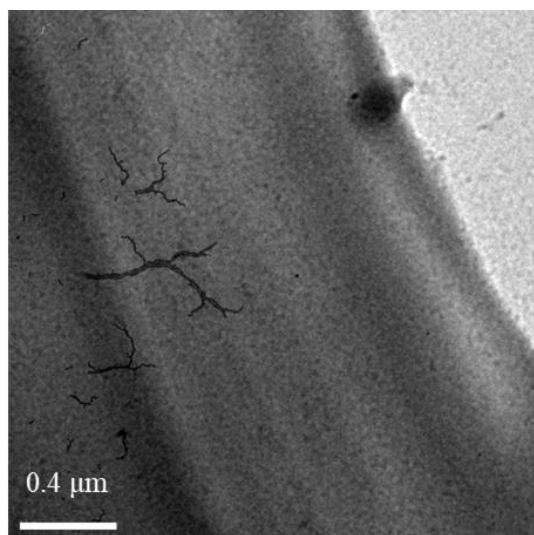
(b) 前翅緑色部、倍率 30000 倍



(c) 前翅緑色部、倍率 20000 倍



(d) 前翅紺色部



(e) 前翅白色部

図 7 前翅 4 色部の断面像

図 7(a-c)より、赤、緑色部には多層膜が確認でき、多層膜干渉による構造発色が示唆された。そこで、両者の色の違いが多層膜の膜厚差に起因すると考え、膜厚とその標準偏差を、画像ソフト ImageJ を用いて図より算出した (表 1)。なお、多層膜の屈折率は先行研究より、電子密度の高い高屈折率膜を 2.0、電子密度の低い低屈折率膜を 1.5 とした^[1]。表 1 より、赤色部の光路長の方が緑色部よりも大きいため、赤色部の方が長波長側にピークがある事実とも一致し、両者の色の違いが多層膜の膜厚によると、より一層示唆された考えられる。

一方図 7(d)、(e)より、白、紺色部には多層膜が確認できなかったため、両者は赤、緑色部と異なり、多層膜による構造色でなく色素で発色していると考えられる。

表 1 前翅赤および緑色部の膜厚 (高低それぞれの屈折率層) と標準偏差

	膜厚(屈折率 2.0) [nm]	膜厚(屈折率 1.5) [nm]
前翅赤色部	80.1 ± 6.8	81.9 ± 6.1
前翅緑色部	80.6 ± 4.8	58.4 ± 7.1

3-3) 光学シミュレーションによる検証

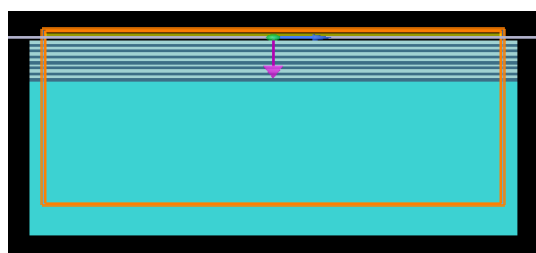
【 3-2) 前翅 4 色部における色の起源 】

前翅赤、緑色部における色の違いが多層膜の膜厚によるものか、より検証を深めるため、図 8(a)のモデルに対し FDTD シミュレーションで反射スペクトルを調べた。ここで、図 8(a)は高低の屈折率層が交互に重なる平坦多層膜モデル(14 層、最表面、基板の屈折率 1.5 とする)で、平均値、標準偏差 (表 1) に基づく膜厚の正規分布から作成した。なお、図 8(a)の長方形(構造より少し小さい中空の枠)はシミュレーション領域を表し、図上部から平面波を入射し、左右端には周期境界条件を適用し、メッシュサイズは真空中で約 10 nm とした。シミュレーション結果を図 8(b)に示す。

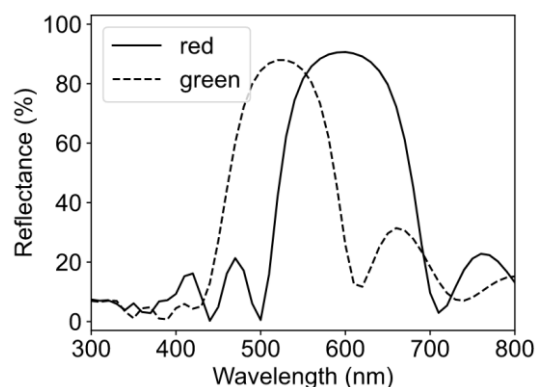
図 8(b)より、FDTD シミュレーションによるスペクトルピークは赤色部で 600 nm 付近、緑色部で 500 nm 付近にある。これらのピーク位置は、実測の反射スペクトル図 6(a)赤色部、緑色部ともよく一致する。よって前翅赤色部、緑色部の色の違いは多層膜の膜厚差によって生じたと判明した。なお、シミュレーションの反射スペクトルが実測と比べ大幅に大きいのは、実数の屈折率を使用し、多層膜による光の吸収を考慮しなかったためと考えられる。

【 3-1) 前翅と腹側の光沢感が違う要因 】

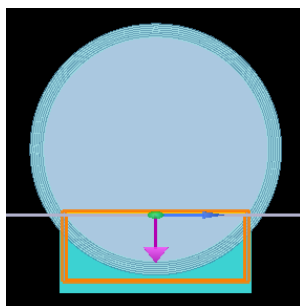
最後に、前翅凹み構造が反射光の拡散と角度依存性の低さに寄与しているかを調べるために、平坦多層膜モデル図 8(a)と、凹み構造を導入した図 8(c)に対する反射スペクトルの角度分布を調べた。膜厚は表 1 の赤色部のデータを用いた。図 8(c)の拡大図を図 8(d)に示す。シミュレーション結果をそれぞれ図 8(e)、図 8(f)に示す。



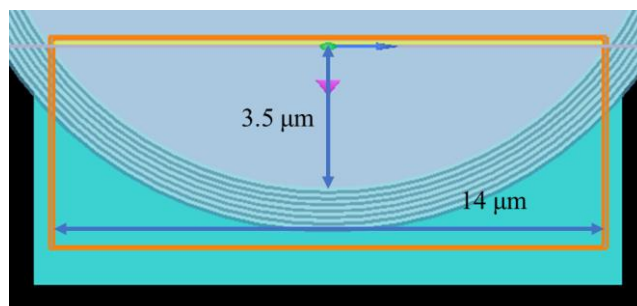
(a) 平坦多層膜モデル(スケールは同図(d)に準じる)



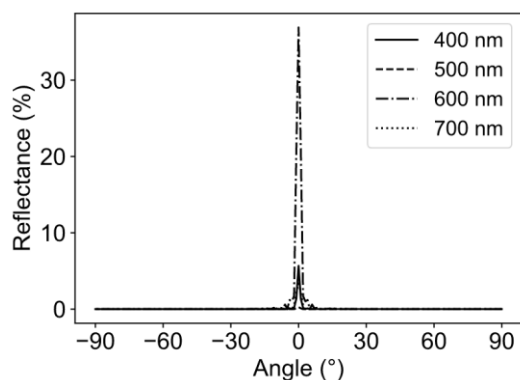
(b) (a)に対する反射スペクトル (シミュレーション)



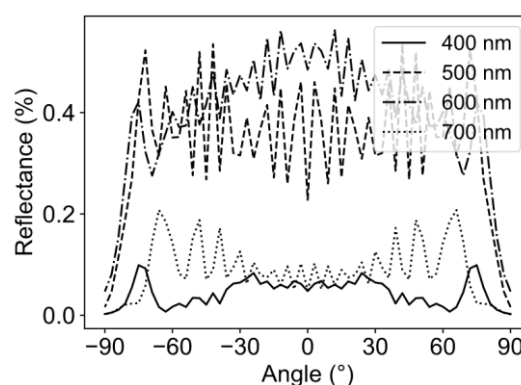
(c) 凹み構造モデル。内径 14 μm の多層膜の円を作成しその一部をシミュレーション領域として切り取った。



(d) 再現した凹み構造は図 6(b)より深さ 3.5 μm 、幅 14 μm とした。



(e) (a)に対する反射スペクトル角度分布
(シミュレーション)



(f) (c)に対する反射スペクトル角度分布 (シミュレーション)

図 8 前翅赤色部の FDTD 法シミュレーションモデル及びスペクトル

図 8(e)より、平坦多層膜モデルの反射スペクトルはほとんどが正反射し、拡散されていないことが分かる。一方、図 8(f)より、凹み構造モデルでは波長 600 nm、500 nm の光が広範に拡散しており、前翅赤色部の角度依存性についての実測スペクトル図 3(a)ともよく一致する結果となった。

以上の結果より、本種前翅の反射スペクトルの角度依存性が低いのはミクロンオーダーの凹み構造によるものと裏付けられる。

4. まとめ

ナミハンミョウの特異な構造色の特性と発色原理について、微小構造観察（光学顕微鏡、SEM、TEM）、光学測定（波長分布、角度分布）、モデリング、シミュレーションにより、解明を試みた。まず前翅 4 色部の色の違いは、赤、緑色部が多層膜の膜厚に起因し、白、紺色部が色素によるものと判明した。通常、自然界では「青は構造色、赤は色素」が多数を占めるが、興味深い事実である。また、前翅と腹側における光沢感の違いは、凹み構造の有無によることが、シミュレーションによる再現でも明確に分かった。本研究の結果は、自然界の構造色に関する新たな知見を与えると同時に、発色体を開発する際の特性やその変調にも預かることが期待される。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、装置・ソフトなど諸ツールの使用法から光学的考察に至るまで、同所属の山下和真氏（博士後期課程 2 年）に大変お世話になりました。また TEM 測定では大阪大学超高压電子顕微鏡センターの研究設備を用いました。SEM 測定では同専攻の竹内昭博技術職員にお世話になりました。また本研究は、（未来基金事業）自主研究奨励事業の支援を受けて進められました。ここに感謝の意を表します。

6. 参考文献

[1] T. D. Schultz & M. A. Rankin, Journal of Experimental Biology, **117**, 87-110 (1985).