2010/1/28 宇宙理論セミナー

Structural color



2010年1月27日水曜日

1

2006年6月8日



光の散乱と青空





2007年1月31日



自然と偏光





そして今回、

「自然と物理」シリーズ第3回

生物の色彩と光学効果

~モルフォ蝶の羽はなぜ青い?~



Structural color of Morpho butterflies G.S. Smith Am. J. Phys. **77** (2009) 1010

2010年1月27日水曜日

5

モルフォ蝶

Wikipediaより

生息地:北アメリカ南部~南アメリカ

種類:80種ほど

分類:タテハチョウ科・モルフォチョウ亜科・

モルフォチョウ族**・モルフォチョウ属**

特長:体にくらべて非常に大きな翅をもち、表面は金属光

沢をもつ。この光沢はほとんどの種類で<mark>青色</mark>に発色

する(鮮やかな翅の色を持つのは雄)。

Morpho Rhetenor



http://www.pref.mie.jp/Haku/Hp/Osusume/morho%20rhetenor.htm

様々なモルフォ蝶(雄)



M. adonis



M. aega



M. cypris

M. sulkowskyi



M. menelaus





M. didius



M. achilles

M. rhetenor

S. Kinoshita, et al. Rep. Prog. Phys. 71 (2008) 076401

2010年1月27日水曜日

8

モルフォ蝶の翅の色(I)

(学名は、



--5 cm ---1

モルフォ蝶

トルエンに浸すと(翅の左部分)、 モルフォ蝶の翅から青色が消える



ymothoe sangaris.

同じまま

毎 央アフリカに生息)









• モルフォ蝶の翅は青色のまま

ベニイロタテハ蝶の翅は脱色
 して色あせる

ベニイロタテハ蝶の翅

青い翅の秘密

- トルエン: 翅の表皮とほぼ同じ屈折率 (n~I.56) index-matching liquid
- 漂白しても色あせない

化学的発色(色素沈着)によるものではない

モルフォ蝶の翅の色は、表皮の微細構造から来る 光学特性に起因している(散乱・干渉)

→ 構造色 (structural color)



1665 Hooke 光学顕微鏡による孔雀や鴨の羽の観察

1917 Rayleigh 電磁気理論にもとづく構造発色の研究

1924-27 Mason 色彩と微視的構造の関係(干渉の影響) → モルフォ蝶の翅の表面構造を予言

電子顕微鏡の開発(I93I年)により、構造発色の 物理的メカニズムが徐々に解明



表面構造のまとめ



ラメラ(lamellae)と呼ばれる膜が何 層にも積み重なった棚構造(ridges) (注・実際はもっと不規則な構造)

モルフォ蝶の翅

幾層ものラメラで散乱(屈折・ 反射)された光が

多層膜干渉

を起こした結果、青色に見える

多層膜干涉



多層膜からの散乱光がお互い干渉する ことで、特徴的な光学特性(角度依存 性・波長依存性)が現れる





薄膜の表裏から反射された光が干渉すること で、波長により強め合ったり弱め合ったりする

例: CD、シャボン玉

モデル

モルフォ蝶の構造発色を理解するモデル

 ・ 鱗粉表面に対して鉛直に光が入射、ridge中の各ラメラで散乱

 ・比誘電率 *ε_{rc}*)

 A ラメラは鱗粉表面に対して傾斜角 γ で等間隔に整列

 (幅 w, 長さ I, 厚さ h, 間隔 g)



Radiation formula

入射光がラメラ部に当たると分極を起こす

電流
(分極電場の変動)

$$\vec{J}_{b} = j\omega\vec{P} = j\omega\epsilon_{0}(\epsilon_{rc}-1)\vec{E}$$
; $\epsilon_{rc} = \sqrt{n} = 2.43 - j0.19$
この分極電場をもとに散乱光が作られる:
+分遠方で
成り立つ表式
 $\vec{E}^{sr}(\vec{r}) = \frac{-j\omega\mu_{0}}{4\pi r}e^{-jk_{0}r}(1-\hat{r}\hat{r}\cdot)\int\int_{V}\vec{J}_{b}(\vec{r}')e^{jk_{0}\hat{r}\cdot\vec{r}'}dV'$
 $= \frac{k_{0}^{2}(\epsilon_{rc}-1)}{4\pi r}e^{-jk_{0}r}\sum_{n=1}^{N}\int_{z'=-w/2}^{w/2}\int_{y'=-l}^{0}\int_{x'=x_{1}}^{x_{2}}(1-\hat{r}\hat{r}\cdot)\vec{E}(\vec{r}')$
 $x_{1}=-[(n-1)(h+g)+h+y\sin\gamma]/\cos\gamma$ × $e^{jk_{0}(x'\sin\theta\cos\phi+y'\sin\theta\sin\phi+z'\cos\theta)}dx'dy'dz'$
 $x_{2}=-[(n-1)(h+g)+y\sin\gamma]/\cos\gamma$.

P

ラメラ中の電場



1つのridgeのみに着目(他のridgesの影響は無視)
計算の単純化のために、



入射光が第n層のラメラに到達するまでを、
 比誘電率

 て表現(左図)

比誘電率 (体積平均) $\epsilon_{rm} = 1 + \frac{(\epsilon_{rc} - 1)wh}{(h+g)s}$

ラメラ内での多重反射は無視

ラメラ中の電場

=入射波+第1反射波

Fresnel's formulae

Reflection & transmission coefficients:



$$R_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}}\cos\xi_{1} - \sqrt{\epsilon_{r2}}\cos\xi_{2}}{\sqrt{\epsilon_{r1}}\cos\xi_{1} + \sqrt{\epsilon_{r2}}\cos\xi_{2}},$$

$$R_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}}\cos\xi_{1} - \sqrt{\epsilon_{r1}}\cos\xi_{2}}{\sqrt{\epsilon_{r2}}\cos\xi_{1} - \sqrt{\epsilon_{r1}}\cos\xi_{2}},$$

$$T_{12} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}\cos\xi_{1} + \sqrt{\epsilon_{r1}}\cos\xi_{2}}{\sqrt{\epsilon_{r2}}\cos\xi_{1} + \sqrt{\epsilon_{r2}}\cos\xi_{2}},$$

$$T_{12} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r1}}\cos\xi_{1}}{\sqrt{\epsilon_{r1}}\cos\xi_{1} + \sqrt{\epsilon_{r2}}\cos\xi_{2}},$$

結果の表式
かなり煩雑な式になる:

$$\vec{E}_{TE}^{sr}(\vec{r}) = -\hat{\theta}k_0^2(\epsilon_{rc}-1)wl(h/\cos\gamma)T_{TET}TEE_{TE}E_{TE}^{i}\frac{e^{-jk_0r}}{4\pi r}\sin\theta C_A(\theta,\phi)$$

 $\times \sum_{n=1}^{N} e^{-j(k_m\cos\psi-k_c\cos\chi)d_n}[C_B(\theta,\phi) + R_{CE}TEC_C(\theta,\phi)],$
 $\vec{E}_{TM}^{sr}(\vec{r}) = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{rc}}}k_0^2(\epsilon_{rc}-1)wl(h/\cos\gamma)T_{mT}T_{mC}E_{TM}^{i}\frac{e^{-jk_0r}}{4\pi r}C_A(\theta,\phi)$
 $\times \sum_{n=1}^{N} e^{-j(k_m\cos\psi-k_c\cos\chi)d_n}[[\hat{\theta}\cos\theta\sin(\gamma-\chi-\phi)-\hat{\phi}\cos(\gamma-\chi-\phi)]C_B(\theta,\phi) - [\hat{\theta}\cos\theta\sin(\gamma+\chi-\phi)-\hat{\phi}\cos(\gamma+\chi-\phi)]R_{cm}TC_C(\theta,\phi)]$

結果の表式(続き)

各係数の表式:

 $C_A(\theta, \phi) = \operatorname{sinc}[(k_0 w/2) \cos \theta] \operatorname{sinc}\{[k_c \sin \chi + k_0 \sin \theta \sin(\gamma - \phi)]l/(2 \cos \gamma)\}$ $\times \exp(j\{[k_c \sin \chi + k_0 \sin \theta \sin(\gamma - \phi)]l/(2 \cos \gamma)\})$

 $C_B(\theta,\phi) = \operatorname{sinc}\{[k_c \cos(\gamma - \chi) + k_0 \sin \theta \cos \phi]h/(2 \cos \gamma)\} \times \exp(-j\{[k_c \cos(\gamma - \chi) + k_0 \sin \theta \cos \phi]]d + k_0 \sin \theta \cos \phi]$

 $C_{C}(\theta,\phi) = \operatorname{sinc}\{[k_{c}\cos(\gamma+\chi) - k_{0}\sin\theta\cos\phi]h/(2\cos\gamma)\} \times \exp[-j2k_{c}(d_{n}+h)\cos\chi] \\ \times \exp(j\{[k_{c}\cos(\gamma+\chi) - k_{0}\sin\theta\cos\phi][d_{n}+h/2]/\cos\gamma\})$

$$f_{c} = \sqrt{\epsilon_{rc}} k_{0}, \ k_{m} = \sqrt{\epsilon_{rm}} k_{0}$$
$$\sin \gamma = \sqrt{\epsilon_{rc}} \sin \chi = \sqrt{\epsilon_{rm}} \sin \psi.$$

パラメーター N, h, w, g, γ, s

が決まれば、散乱光は λ, θ, Φ の関数として与えられる。



Quantity	Description	Value
N	Number of lamellae	8
h	Thickness of lamellae	65 nm
W	Width of lamellae	400 nm
8	Spacing between lamellae	155 nm
γ	Tilt angle of lamellae	10°
S	Spacing between ridges	700 nm

Irradiance of scattered field:

$$I^{\rm sr} = I_{\rm TE}^{\rm sr} + I_{\rm TM}^{\rm sr} = \hat{r} \cdot \left[\text{Re}(\vec{S}_{c,\rm TE}^{\rm sr}) + \text{Re}(\vec{S}_{c,\rm TM}^{\rm sr}) \right] = \frac{1}{2\zeta_0} (|\vec{E}_{\rm TE}^{\rm sr}|^2 + |\vec{E}_{\rm TM}^{\rm sr}|^2),$$

Total power:

モデル パラメーター

$$\langle P^{\rm sr} \rangle = \left(\int_{\phi=0}^{\pi/2} + \int_{\phi=3\pi/2}^{2\pi} \right) \int_{\theta=0}^{\pi} I^{\rm sr}(r,\theta,\phi) r^2 \sin \theta d\theta d\phi$$



実験との比較



実験データと同じように青色にピーク…でもなぜ?

なぜ青くなる?



ビーク波長

$$\lambda \approx 460$$
nm, $\phi \approx 20^{\circ}$ で強度が最大
 $A \approx 460$ nm, $\phi \approx 20^{\circ}$ で強度が最大
 $\phi \approx 460$ nm, $\phi \approx 20^{\circ}$ で強度が最大
具体的な条件式:
 $\lambda_{peak} = \frac{(h+g)}{\cos \gamma}$
 $\times \left[\cos 2\gamma + \sqrt{\epsilon_{rm}}\cos\left\{\sin^{-1}\left(\frac{\gamma}{\sqrt{\epsilon_{rm}}}\right) - \gamma\right\}\right]$
 $\phi_{peak} = 2\gamma$
 $\epsilon_{rm} = 1 + \frac{(\epsilon_{rc} - 1)wh}{(h+g)s}$
 $\phi_{w} = 1 + \frac{(\epsilon_{rc} - 1)wh}{(h+g)s}$



ラメラの枚数と波長特性



スペクトル幅は変わるがピーク波長はほぼ同じ

まとめ

モルフォ蝶の翅はなぜ青い?その物理的メカニズム

{多層膜からの散乱光の干渉に強め合う
単一ラメラによる散乱パターンの強弱

これらの条件が一致する波長域が青色だった

さらにレイリー散乱が短波長側の波長特性を強調

人工的に構造色を作る





Appendix



生物学的理由

そもそも、青い色素を持つ生物はほとんどいない (青く見える魚のほとんどは構造発色)

青い色素胞を持つ魚 (cyanophores)

(色素物質の化学特性はよくわ かっていないらしい)



青色自体、自然界にはそう多く存在しない → 警戒色?