

平成 21 年 5 月 18 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008 ～ 2009

課題番号：20740242

研究課題名（和文）鳥の羽根のフォトニック構造とその光学特性

研究課題名（英文）Photonic structures in bird feathers and their optical properties

研究代表者

吉岡 伸也（YOSHIOKA SHINYA）

大阪大学・大学院生命機能研究科・助教

研究者番号：90324863

研究成果の概要（和文）：

鳥の羽根の構造的な発色の物理機構を調べるため、ドバトやクジャクなどの数種類の鳥を対象にして、羽根内部の微細構造の観察と光学特性の評価を行った。特にドバトの首の羽根においては、羽根の構成要素である羽枝や小羽枝の構造とその光学的な特徴を明らかにし、異なるサイズの構造が総合的に生み出す発色機構を解明した。また、反射スペクトルの形状と色覚とが対応することで、独特な視覚効果が得られていることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

In order to clarify the mechanisms of the structural colors of bird feathers, we have investigated microstructures and optical properties of the feather of several species of birds including the rock dove and peacock. In particular, for rock dove, several structural elements have been carefully characterized and the comprehensive mechanisms of the structural coloration have been elucidated. In addition, it has been found that the peculiar visual effects are realized by the correspondence between the spectral line shape and the color sensitivities of vision.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：生物物理・化学物理

キーワード：構造色、鳥、羽根、フォトニック構造

1. 研究開始当初の背景

タマムシやクジャクなどを代表例として、自然界の多くの生物が光の波長サイズの微細な構造体を利用して、輝きのある鮮やかな色を生み出している。構造色と呼ばれるこれ

らの色は、通常の光吸収を起源とする色よりも反射率や彩度が高いため、発色の物理機構は古くから興味をもたれてきた。例えば、力学や光学で有名なニュートンも、その著書の中でクジャクの羽根についての記述をして

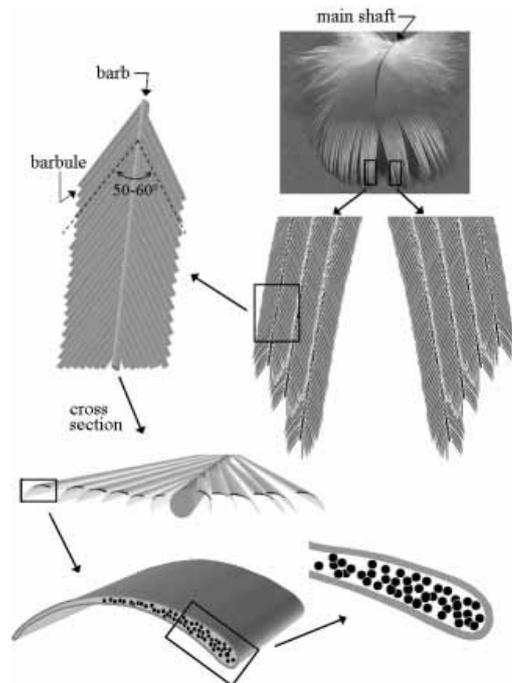


図1 ハトの羽根の構造の模式図

J. Phys. Soc. Jpn. 77(2008)124801より引用。

いる。20世紀後半以降になって、電子顕微鏡が開発されると、輝きの背後には微細な周期構造が発見された。そのため、光の干渉が構造色の起源として定説になっていった。

しかし、単純な干渉だけでは説明のつかない発色現象が最近の研究により次々と明らかになっている。例えば青いモルフォチョウにおいては、構造の不規則性が重要な役割を果たしている。また、微細な構造だけでなく数百 μm 程度の大きなサイズの構造が影響する例(ニシキオオツバメガ)や、色素との共存が重要な役割を果たす系も発見されている。

2. 研究の目的

本研究では、自然界の生物の中で、特に鳥の羽根の構造色に注目して研究を行った。その目的は、羽根の内部にあるフォトニック結晶に類似した微細構造を明らかにすること、そしてその光学特性の評価を行い、発色の物理的な機構を明らかにすることである。一般に鳥の羽根は、羽の中心軸(羽軸)と、そこから二回枝分かれした構造で構成されている。最初の枝は羽枝と呼ばれ、羽軸から左右に伸びている。さらに、羽枝からは小羽枝と呼ばれる小さな枝が両側に伸びており、羽根の色は主として小羽枝が担っている。小羽枝は数十 μm ほどの幅でしかないので、そのような小さな領域で光学特性を把握するための装置開発を行うことも目的の一つとした。

3. 研究の方法

(1)光学顕微鏡を用いた基礎的な観察に加えて、電子顕微鏡を用いて微細構造の評価を行

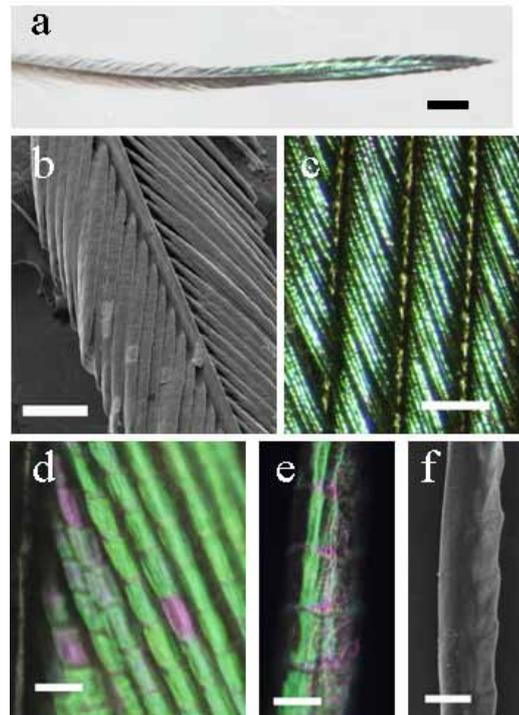


図2 ハトの羽根の顕微鏡写真

J. Phys. Soc. Jpn. 77(2008)124801より引用

った。表面構造の観察には走査型電子顕微鏡日立S-800を利用した。内部構造の詳しい観察には、透過型電子顕微鏡日立H-7650を用いた。走査電顕観察では、試料表面をOsでコートし、電気伝導性を高めた。透過電顕観察のための超薄切片は、試料を脱水した後、エポキシ樹脂に包埋する標準的な方法で準備した。

(2)絶対反射率測定

羽根の持つ反射率の絶対値を把握するため、積分球を用いた測定を行った。分光光度計(日本分光、V-670)を使用し、可視光領域だけでなく、赤外線や紫外線領域をも含む広帯域で反射スペクトルを測定した。

(3)角度依存スペクトル測定

小羽枝の一部にキセノンランプからの白色光を小さく集光し、周囲にスクリーンを配置することで、反射方向の広がりとその色を定性的に観察した。定量的な測定には、試料を中心にして光ファイバーを回転させることで、反射スペクトルの角度依存性を測定した。この測定方法は、ファイバーの回転面で定まる二次元的な面上でしか測定を行うことができない欠点を持つ。この問題を克服するために、楕円鏡を用いた反射パターンイメージングを行い、反射半球全体での反射特性を評価した。

(4)理論計算

複雑な微細構造が持つ光の反射特性を理

論的に調べるため、いくつかの解析的・数値的計算方法を用いた。一つは、トランスフォーマトリックス法(TM法)で、無限に広い多層膜構造においては、容易に解析的な計算が実行可能である。一方、円柱が周期的に並んだ系においても、拡張されたTM法を用いて反射率の数値計算を行った。また、時間領域有限差分法(FDTD) 厳密波結合解析法(RCWA)の適用も現在進行中である。

4. 研究成果

二年間の研究期間、ドバト、クジャク、ハチドリ、カワセミ、カラスについて、光学測定や微細構造の観察を行い、発色の仕組みを研究してきた。ここでは主な研究結果として、ドバトの首の羽根の構造色の仕組みについて詳しく記述する。

公園や駅でよく見かけるドバトの首の羽根は身近な構造色の代表例である。しかし、その羽根は単純には説明のつかない色変化を持つ。通常、光の干渉が起きる場合、干渉条件が波長と角度を関連付けるため、玉虫色と呼ばれるような連続的な角度変化が生じる。ところが、ドバトの構造色はどのような照明条件下で観察しても緑か紫のどちらかにしか見えず、角度を変えながら観察するとその二色の間で急激に色が移り変わるのである。このような二色性を持つ構造色の起源を明らかにするため、徹底的な構造観察と光学測定を行った。

観察された羽根の構造要素は、図1のようにまとめることができる。羽軸から左右に分かれた羽枝は、その片側が隣の羽枝によって覆われている。すなわち、羽枝から両側に伸びた小羽枝のうち、その片側のみが外側に露出している。その結果、露出した小羽枝は全て同じ方向に向いた状態にあり、光の反射の方向をそろえる働きがある。さらに、小羽枝の断面は、湾曲した三日月(円弧)のような形状を持っている。ただし、小羽枝の一部分は隣の小羽枝と重複し、円弧の一部分しか外側には露出していない。このような様子は図2に示す光学顕微鏡写真にもはっきりと現れている。

さらに詳しく小羽枝の断面を観察すると、扁平した袋状の外皮の中には、直径数百 nm 程度の顆粒が数多く詰まっている様子が見られた。この顆粒はメラニン色素を含有すると考えられているが、その配置は乱雑なので構造色を生み出すとは考えられない。したがって、唯一干渉を起こして、着色の直接的な原因になりそうなのが、厚さ 650 nm 程度の外皮部分である。

一方、小羽枝一部分のみを光照射して反射パターンの観察とスペクトルの測定を行った。(図3) その結果、小羽枝の湾曲に対応して反射光は、ある面内にもみ大きな角度範囲

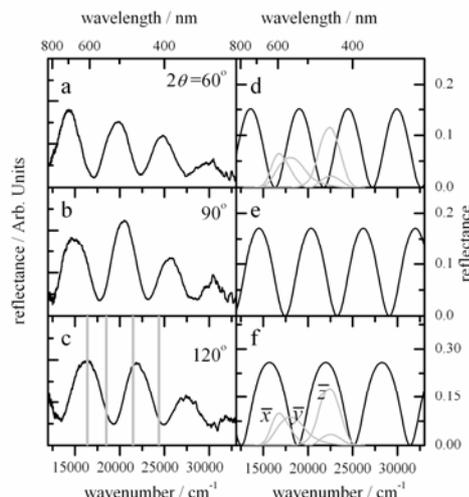


図3 ハトの羽根の反射スペクトル。

実験(左)と理論(右)の比較。

J. Phys. Soc. Jpn. 77(2008)124801より引用

に広がりをもつことが分った。しかも、角度が大きくなると 90 度付近で突如として色が緑から紫に変化することがはっきりと観察され、このことは二色性を持つ羽根の色に対応している。

いくつかの反射角度においてスペクトルを測定すると、外皮の膜が起こす干渉現象の理論から予想される通り、三角関数のような形状を持つスペクトルが得られた。可視光の範囲には三次から五次までの高い次数の干渉による反射がみられ、角度が変化するとスペクトルは平行移動するように見える。

それでは薄膜干渉という単純な光学現象が、どのようにして二色に限定された色変化を生じるのだろうか。その疑問に答えるため、人間の眼の等色関数(赤、緑、青の三原色の分光感度曲線に相当する)と反射スペクトルを比較すると、反射ピークの間隔と赤と青の等色関数との間隔がおよそ一致していることが分った。すなわち、異なる次数の二つの干渉ピークが、赤と青の等色関数と広く重複している反射角度においては、二つの色が混合し紫色が知覚される。一方、角度の変化に伴い、反射スペクトルがシフトすると、赤と青の等色関数との重なりが同時に減少しながら、三原色の中で残っていた緑との重複が増加する。そのため、紫色から緑色の色変化が生み出される。すなわち二色性の起源は、反射スペクトルの形状と色覚が対応することにある。二色間での色変化が急激であることも、色度座標を用いた議論により定量的に確かめられた。

さらに、上述の議論をより直接的に示すために、白色光のスペクトルを任意の形状に変調する光学系を構築し、薄膜干渉を再現する変調を与えてその色を観察した。その結果、650 nm という外皮の厚さは、彩度の高さとして

色性を同時に実現する最適な厚さ領域にあることがわかった。

三原色の人間とは異なり、ドバトは四原色の色覚を持つといわれている。対応する四種類の視物質の最大感度波長を反射スペクトルに重ねてみると、四つうちの二つがほぼピークに重なっていることが分かった。角度が変化すると、残った二つとの重複が大きくなることから、人間の色覚で行った二色性に関する議論が、ドバトの色覚においても成立することが期待されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

S. Yoshioka and S. Kinoshita: "Optical effects of highly curved multilayer structure found in the scale of structurally colored moth", Proc. SPIE, 査読有, Vol. 7401, 2009, 740105-1-14.

E. Nakamura, S. Yoshioka and S. Kinoshita: "Structural color of rock dove's neck feather", J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 77, 2008, 124801-1-12.

S. Kinoshita, S. Yoshioka and J. Miyazaki: "Physics of structural colors", Rep. Prog. Phys. 査読有, Vol. 71, 2008, 076401-1-30.

M.A. Giraldo, S. Yoshioka, D.G. Stavenga: "Far field scattering pattern of differently structured butterfly scales", J. Comp. Physiol. A, 査読有, Vol. 194, 2008, 201-207.

吉岡伸也、木下修一, "昆虫や鳥の構造色とその多彩な光学効果", 日本物理学会誌, 査読有, Vol. 64, pp. 619-623(2009).

吉岡伸也, "ニシキオオツバメガの鱗粉構造と発色の仕組み", 昆虫と自然, 査読有, vol. 44, 2009, pp.16-19.

吉岡伸也, "蝶の翅の構造色: 鱗粉の微細構造, 湾曲, 重なり光学効果", 比較生理生化学, 査読有, Vol. 25, 2008, pp. 86-95.

[学会発表](計18件)

吉岡伸也: 「構造色の新しい光学測定法」2009年11月13日第10回構造色シンポジウム(日本ペイント株式会社、東京センタービル)

木下修一、李銀玉、吉岡伸也、杉田昭栄: 「カラスの濡羽色の仕組み」,2009年11月13日第10回構造色シンポジウム(日本ペイント株式会社、東京センタービル)

吉岡伸也: 「生物のナノ構造による発色」, 2009年10月22-23日、2009年度色材研究発表会(エル・おおさか)

松花文太、吉岡伸也、大島範子、木下修一: 「ネオンテトラの構造色」2009年10月21日第7回積水化学自然に学ぶものづくりフォー

ラム(積水化学工業(株)京都研究所)

S. Yoshioka, T. Hariyama, and S. Kinoshita: "Structural color of jewel beetle", 2009年10月1-2日 International symposium on Engineering Neo-Biomimetics (AIST Tokyo Waterfront)

吉岡伸也、永治恵理、木下修一: 「蝶の翅のレトリフレクション」2009年9月25-28日 日本物理学会 2009年秋季大会(熊本大学黒髪キャンパス)

木下修一、李銀玉、吉岡伸也、杉田昭栄: 「カラスの濡羽色の起源」,2009年9月25-28日 日本物理学会 2009年秋季大会(熊本大学黒髪キャンパス)

松花文太、吉岡伸也、大島範子、木下修一: 「ネオンテトラの構造色-色変化メカニズムの検証」2009年9月25-28日 日本物理学会 2009年秋季大会(熊本大学黒髪キャンパス)

針山孝彦、堀口弘子、弘中満太郎、吉岡伸也: 「動物界における偏光受容細胞の多様性」2009年9月2-4日 第11回日本進化学会大会(北海道大学)

S. Yoshioka and S. Kinoshita: "Modified multilayer systems in the structural color of animals", 2009年8月2-6日 SPIE Optics + Photonics meeting(San Diego, USA)

B. Matsuhana, S. Yoshioka, N. Oshima and S. Kinoshita: "Detailed optical investigation of variable iridescence in neon tetra", 2009年7月9-15日 "Workshop on "Bio-Inspired Photonic Structures" (San Sebastia'n, Spain)

S. Yoshioka, B. Matsuhana, and S. Kinoshita: "Optical setup for the simultaneous measurement of reflection spectrum and reflected-light direction under an optical microscope" 2009年7月9-15日 "Workshop on "Bio-Inspired Photonic Structures" (San Sebastia'n, Spain)

吉岡伸也: 「虫、鳥、魚の構造色」2009年4月8日 第48回生命機能研究科コロキウム(大阪大学)

吉岡伸也、M.A.Giraldo、D.G.Stavenga、木下修一: 「楕円鏡を用いたモルフォチョウの反射パターン測定」2009年3月27-30日 日本物理学会 2009年第64回年次大会(立教大学)

吉岡伸也: 「生物のナノフォトンクス構造」2009年3月4,6日 第四回非線形テクノサイエンス講演会(大阪大学)

吉岡伸也、針山孝彦、木下修一: 「タマムシの構造色: 多層膜干渉の特徴」2008年11月15日 第9回構造色シンポジウム(大阪大学)

吉岡伸也: 「蝶の翅・鳥の羽根: 構造色の

物理学と生物学」2008年11月6-7日 第6回
知と行動研究シンポジウム「知と行動研究の
ストラテジーVI」(箕面市)

吉岡伸也、針山孝彦、木下修一：「タマム
シの構造色の仕組み」2008年9月20-23日
日本物理学会2008年秋季大会(岩手大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉岡 伸也 (YOSHIOKA SHINYA)

大阪大学・大学院生命機能研究科・助教

研究者番号：90324863

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし