

〈原著〉

インコ羽毛の反射スペクトルと構造の関係

岡崎 登志夫、山村 拓也

Relationship between the reflection spectrum and structure of parrot feathers

Toshio Okazaki and Takuya Yamamura

Summary We analyzed the light scattering absorption and reflection spectra of black crow feathers and white, yellow, brown, blue, and green parrot feathers using absorption and reflection spectrophotometers. The absorption and reflection spectra exhibited an almost mirror image relationship, which was especially clear for the yellow and brown parrot feathers. The yellow and brown colors displayed by parrot barbs originate from pigments, so this phenomenon might also be seen in nature. Next, we examined transverse sections of the crow and parrot barbs using a microscope, oblique or transmitted illumination, and the direct or oil-immersion method. Based on these examinations, we confirmed that the colors exhibited by the crow and parrot barbs originated from their pigments, structures, or a combination of the two. The black color of the crow barbs was found to originate from their cortical melanin granules. In the parrot barbs, the white color was derived from the microbubble structure of the medulla, the yellow and brown colors were produced by pigments, and the blue color originated from the nanostructure of the spongy layer. It was assumed that the blue appearance of the light reflected from the spongy layer and the brown appearance of the light transmitted through the spongy layer were caused by light scattering because light with shorter wavelengths is more easily reflected. In addition, the green color of the parrot barbs was derived from by a combination between the blue color produced by the nanostructure of the spongy layer and the yellow color derived from the pigment in the cortex.

Key words: parrot, feather, reflection, spectrophotometry, microscopy

I. 緒言

インコやクジャクなどの羽毛は、さまざまな美しい色を示す。この発色のメカニズムについては、構造色に由来するとして、多くの研究者

がさまざまな研究を行ってきた^{1)~7)}。羽毛は、羽軸、羽枝、小羽枝から成り、小羽枝は、羽枝の間で互いに会合し、重なり合い、鉤型構造で連結している。羽枝の横断切片は、髄質、スポンジ層、皮質の三層から成り、クジャクでは、

ヤマザキ学園大学
〒192-0364 東京都八王子市南大沢4-7-2
受領日：平成28年6月22日
受理日：平成28年7月11日

Yamazaki Gakuen University.
Minami-osawa 4-7-2, Hachioji, Tokyo 192-0364,
JAPAN

皮質部にメラニン顆粒が規則正しく並び、この構造が色発現に重要な役割を果たすことが知られている¹⁾。またインコでは、髄質と皮質の間には、ナノサイズの間隙が規則正しく並んだスポンジ層があり、この構造が青色の光を反射するとされる^{3), 6), 7)}。さらに、インコは、黄色から赤色までの独特な色素・サイタコファルピンを持つことが知られている⁸⁾。これらの色素色と構造色が融合し、さまざまな色を発現すると考えられる。その融合のメカニズムについては、さまざまな光学的分析が行われているが^{3)-4), 6), 7)}、実際に羽毛上でそれぞれどのように発色し、融合しているのかについては必ずしも明確ではない。今回我々は、先に報告した羽毛の簡易拡散反射吸光度分析⁹⁾や反射分光分析及び光学顕微鏡を用いた形態観察を行い、色素色と構造色の発現と、それらの融合による羽毛の緑色発現機構について検討を行った。

II. 材料と方法

(a) 材料

ハシブトガラス (Corvus macrorhynchos) の黒色羽毛、オカメインコ (Nymphicus hollandicus) の白色羽毛、コガネメキシコインコ (Aratinga

solstitialis) の黄、赤褐色羽毛、オトメズグロインコ Lorius lory の青色羽毛、キエリボウシインコ (Amazona auropalliata) の緑色羽毛を用いて実験を行った。

(b) 簡易拡散反射吸光度分析

紫外可視分光光度計のキュベットに投入された鳥羽毛に、光源からの光がピンホールを通して照射されるように、キュベットに次のような簡単な加工を施し、簡易拡散反射吸光度分析を行った⁹⁾。すなわち、キュベットの入光面とその側面にアルミ箔を貼り、その入光面中央部に、直径1 mmの光通過のためのピンホールを設けた。また、ピンホールの反対側のキュベット面には幅5 mmのアルミ箔を貼りつけ、ピンホールから入った光が、フォトマルチプライヤーに直接到達しないようにした (Fig.1)。この加工キュベットを用いて、羽毛からの拡散反射光の吸光度分析を行った。但し、アルミニウムの近紫外部から紫外部の反射は著しく低下するため、今回は、400-800 nmの可視部について拡散反射光の吸光度分析を実施した。

(c) 反射分光分析

浜松フォトリクス社のミニ分光器C11009MAを用いて、それぞれの色の羽毛の太陽光下における反射スペクトルを、薄層クロマトグラフィー

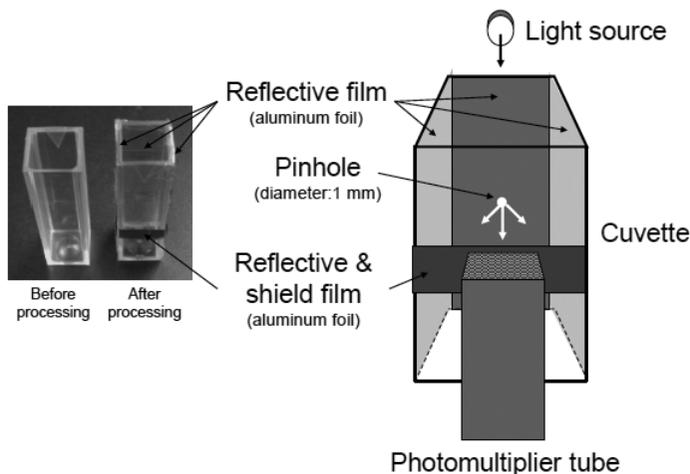


Fig. 1 Methods of simplified optical analysis using an ultraviolet visible spectrophotometer

Simplified optical analysis of feathers: Analytical cuvettes were processed to detect the scattered light from the materials as follows: Aluminum foil was applied to the cuvette surface on the light-source side, a pinhole (diameter: 1 mm) was made in its center, and aluminum foil (5 mm in width) was attached to the cuvette surface on the opposite side. A feather was put into a cuvette, and the absorbance between 400 and 800 nm was analyzed.

用シリカゲル板を対照として測定し、値は相対反射比率 (A/D Count Ratio) として示した。反射分光分析の比較材料としては、羽枝髄質と似た直径1-10 μm 程度のマイクロバブル構造を持つ古河電工株式会社 (平塚、神奈川) の超微細発泡光反射板MCPET-S4とこれに紫外線吸収防止処理を施したMCPET-RBを用いた。

(d) 羽毛の横断切片の作成と光学顕微鏡観察

ハシプトガラス及びインコ羽毛の羽枝部をパラフィン包埋し、ユング型ミクロトームで厚さ7.5 μm に薄切し、加熱伸展後、スライドガラスに張り付け、横断切片標本を作成した。この羽枝横断切片標本の観察はオリンパス社の光学顕微鏡を用いた。切片の透過照明による直接観察後、油浸オイルをたらして再度、透過光の色を観察した。次に、透過照明装置をオフにして、側方からエレコム社の白色LED照明器具で斜方照明を行い、切片からの反射光を観察した。また、切片下の台紙を白色またはカーボンブラック塗布した黒色にして切片からの反射光を比較した。

Ⅲ. 結果

A. 拡散反射吸光度分析及び反射分光分析

カラスの黒色、インコの白、黄、赤褐色、青、緑色羽毛について、紫外可視分光光度計の加工キュベットを用いた拡散反射吸光度分析と浜松フォトリクス社のミニ分光器C11009MAを用いた反射分光分析とを行った結果、それぞれの羽毛の光の吸収と反射の特徴が明らかになった。すなわち、黒色羽毛は、400 nm-800 nmの可視光域全体で吸光度が高く、反射光は可視光域全体で低かった (Fig.2A)。白色羽毛は、400 nm-800 nmの可視光域全体で吸光度が低く、反射光は可視光域全体で高かった (Fig.2B)。黄色羽毛は、400 nm-500 nmの吸光度が高く、550 nm-800 nmの反射光が高かった (Fig.2C)。赤褐色羽毛は、400 nm-600 nmの吸光度が高く、600 nm-800 nmの反射光が高かった (Fig.2D)。青色羽毛は、400 nm-800 nmの可視光域全体で吸光度が高いものの、550 nmより短波長側で低下する傾向が認められ、400 nm-600 nmの反射光がやや高い傾向が認められた (Fig.2E)。緑色羽毛では、400 nm-600 nmの間の吸光度が低く、

反射光は、550 nm付近に小さなピークが認められた (Fig.2F)。吸収スペクトルと反射スペクトルのグラフは、黒、白、黄、赤、青、緑色羽毛とも、概ね、吸収スペクトルが高いと反射スペクトルが低く、吸収スペクトルが低いと反射スペクトルが高い鏡像関係を示したが、特に黄色と赤褐色羽毛例で、その関係が顕著であった (Fig.2C, D)。

B. 羽枝横断切片の光学顕微鏡観察

ハシプトガラスの黒色羽枝とインコの白、黄、赤褐色、青、緑色羽枝について、厚さ7.5 μm の横断切片を作成し、光学顕微鏡で観察を行った。透過照明では、ハシプトガラス、インコとも、全ての羽枝髄質部に直径約10-20 μm 程度のマイクロバブル構造が認められた (Fig.3)。ハシプトガラスの黒色羽枝では、皮質にメラニン顆粒の分布が認められ、髄質のマイクロバブル構造体の周りにも少量のメラニン顆粒の分布が認められた (Fig.3A)。インコの白色羽枝では、皮質、髄質に色素の分布は全く認められなかった (Fig.3B)。黄、赤褐色羽枝では髄質のマイクロバブル構造のほかに、皮質に、黄、赤褐色の色素分布が認められた (Fig.3C, D)。青、緑色羽枝では、髄質のマイクロバブル構造体の周りにメラニン顆粒がたくさん付着しているのが観察された。その外側の髄質と皮質の中間部は、透過照明下の直接観察では橙色を示し、油浸観察では透明に変化した。また、斜方照明では、直接観察で橙色を示した部分が青色に輝いていた (Fig.3E)。斜方照明における青色羽枝切片からの構造色反射について、背景が白の場合と黒の場合を比較すると、黒の方が青色の輝きが強かった (Fig.3G)。緑色羽枝では、透過照明で皮質に黄色の色素分布が確認され、斜方照明では、皮質部が緑色を示した (Fig.3F)。

C. インコ白色羽毛の反射スペクトルと構造の関係

インコ白色羽毛の反射スペクトル特性を解析するため、白色羽毛の反射スペクトルをシリカ板や直径1-10 μm のマイクロバブル構造を持つ古河電工の超微細発泡光反射板MCPET-S4やそれに紫外線吸収防止加工をしたMCPET-RBの反射スペクトルと比較した。Figure 4のグラフに挿入した写真からも明らかのように、白色羽毛はMCPET-RBと同じか、それ以上の白さを示し

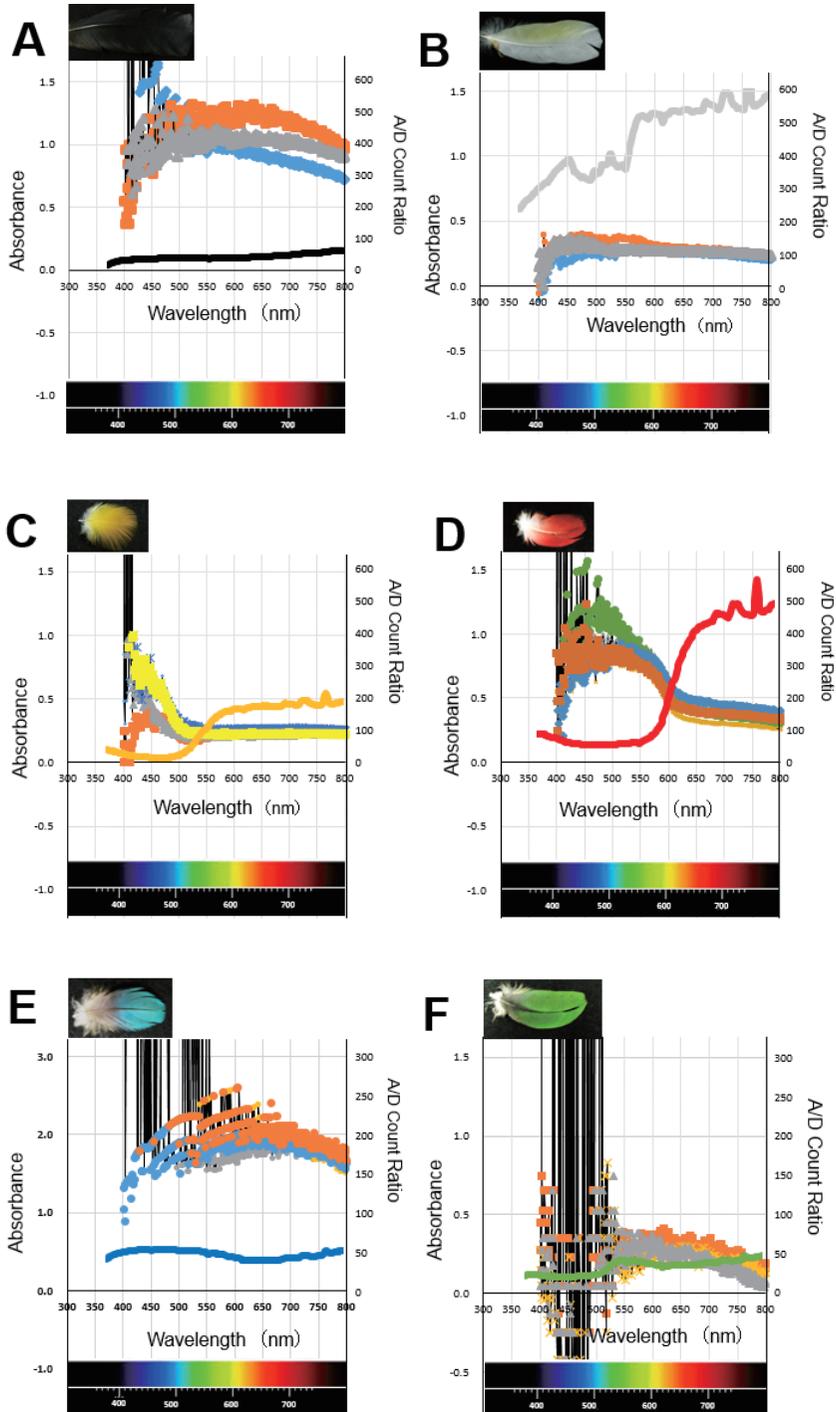


Fig. 2 Optical analysis of feathers from a crow and parrots.
 A: a crow black feather; B: a parrot white feather; C: a parrot yellow feather; D: a parrot brown feather; E: a parrot blue feather; F: a parrot green feather.
 Dotted line: absorbance spectrum (the y-axis on the left edge); solid line: reflection spectrum (the y-axis on the right edge).

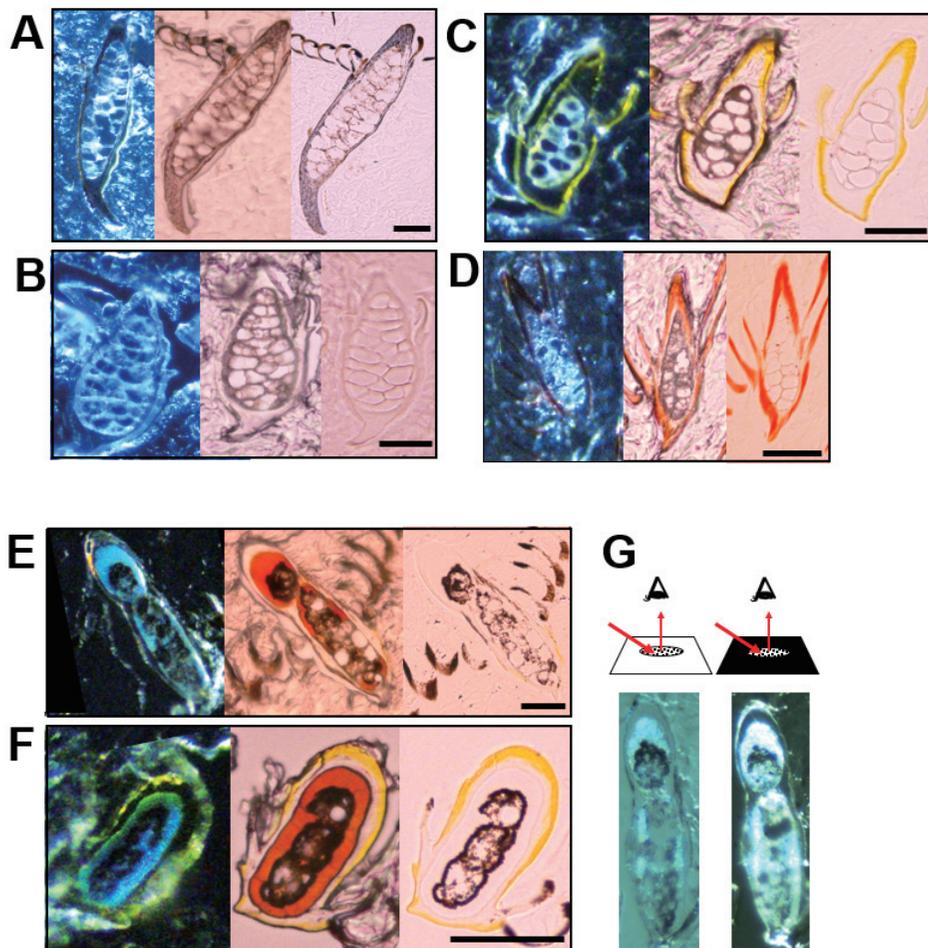


Fig. 3 Optical micrograph of the transverse section of barb from crow and parrot feathers.
 A: a crow black feather; B: a parrot white feather; C: a parrot yellow feather; D: a parrot brown feather; E: a parrot blue feather; F: a parrot green feather.
 Left: oblique illumination; middle and right: transmitted illumination. Middle: non-oil sample using the transmitted illumination; right: oil immersion sample using the transmitted illumination. All black bars = 50 μ m. G: comparison of the reflection from the transverse section of blue barb (the middle of the board) between on the white board and the black board.

た。白色羽毛やMCPET-S4は、シリカゲル板やMCPET-RBに比べて近紫外部の吸収率が高かった。白色羽毛とMCPET-S4とでは、白色羽毛の方がMCPET-S4に比べて近紫外線の吸収率が高かった(Fig.4)。

IV. 考察

インコやクジャクの羽毛は、さまざまな鮮やかな色を示す^{6),7)}。羽毛の色素成分としては、

メラニン色素のほか^{1),2),5)}、特にインコ羽毛では、黄から赤色までのインコに特有な色素・サイタコファルビンの存在が知られている⁸⁾。さらに近年、構造色の研究がさまざまな分野で数多く行われ、スポンジ層にはナノサイズの間隙が整然と並び、青色を発することが明らかにされた^{3),6),7)}。インコ羽毛では、この黄や赤色の色素・サイタコファルビンと青色構造色の組み合わせによって、色の三原色（シアン、イエロー、マゼンダ）の光源材料が揃うこととなり、さまざまな色の

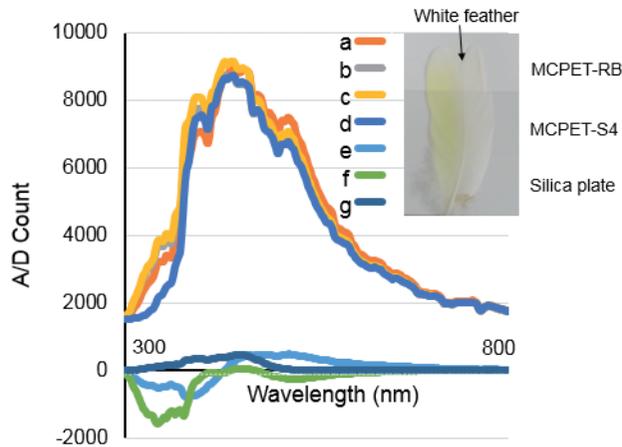


Fig. 4 Comparative analysis of the reflection spectrum of the white feather to the silica, the MCPET-S4 and the MCPET-RB plate.

Each of reflection spectrum was indicated as a colorful solid line, and the line e, f and g showed the difference spectrum of white feather, MCPET-S4 and MCPET-RB to silica plate. a: white feather; b: silica plate; c: MCPET-RB; d: MCPET-S4; e: white feather/silica; f: MCPET-S4/silica; g: MCPET-RB/silica.

The photograph of MCPET-RB, MCPET-S4, Silica plate and white feather inserted on the figure was taken under the LED light.

発現が可能になっていると考えられた。そこで、これらの色素と構造色が、実際に羽毛上でどのように融合して色を発しているのかについて、分光学的研究と、構造学的研究を同時に行った。

ハシブトガラス羽毛の吸光度は高く、反射光は低かったが(Fig.2A)、インコの白色羽毛の吸光度は低く、反射光は高かった(Fig.2B)。ハシブトガラス羽枝の皮質には、たくさんのメラニン顆粒が分布したが(Fig.3A)、インコの白色羽枝には色素が全く存在せず、髄質にしっかり緑取られたマイクロバブル構造が存在した(Fig.3B)。白色羽毛反射スペクトルを人工素材のシリカゲル板やマイクロバブル構造を持つMCPETの反射スペクトルと比較すると、MCPET-S4では、白色羽毛同様、紫外線を吸収する性質が確認された(Fig.4)。このことから白色羽毛はマイクロバブル構造によって近紫外線を吸収し、これより長波長側の可視光を強く反射しているものと考えられた。

鳥の視細胞は、近紫外線を感知できることが知られており¹⁰⁾、人間には同じ白色に見えても、鳥は紫外線の吸収能の違いによって、素材を容

易に識別できるのかもしれない。黄色や赤褐色羽毛の吸収スペクトルと反射スペクトルのグラフは明瞭な鏡像関係を示した(Fig.2C, D)。黄色や赤褐色羽枝では、皮質に黄色や赤褐色の色素が分布しており(Fig.3C, D)、これが吸収スペクトルと反射スペクトルの鏡像関係の発現に直接影響していると考えられた。青色や緑色羽毛の吸収スペクトルと反射スペクトルのグラフは、黄色や赤褐色羽毛に比べて鏡像関係が極めて不鮮明であった(Fig.2E, F)。青色や緑色羽毛は、一定の吸収スペクトルを持つ色素によって色を発現しているのではなく、構造色によって色を発現しているためではないかと考えられた。青色羽枝横断面の光学顕微鏡写真では、髄質と皮質との間が、斜方照明の反射光では青色、透過照明の直接観察では橙色、油浸観察では無色透明になり(Fig.3E)、この部分が、ナノサイズの空隙構造を持つスポンジ層であると考えられた。すなわち、スポンジ層のナノレベルの空隙構造では短波長領域の光を反射し易いため、斜方照明下の反射光が青色を示し、透過照明ではその補色に相当する長波長領域の光がスポンジ層を透過し、橙色に見えるものと考えられた。

また、この構造にオイルが入ると、屈折率の変化によって短波長の反射率が低下し、スポンジ層を短波長から長波長の広領域の光が透過し、透明になるものと考えられた。スポンジ層下の髄質のマイクロバブル構造表面には、メラニン顆粒が多数付着しているのが確認された(Fig.3E)。青色の構造色発現には、メラニン顆粒が重要な役割を果たしていることが知られている^{1),2)}。青色羽枝の横断切片の背景を白色や黒色に変えて、斜方照明で観察したところ、黒色の方が、スポンジ層の青色が一層輝いて見えたことから(Fig.3G)、髄質のメラニン顆粒が、青色発現を促進しているものと考えられた。緑色羽枝の顕微鏡観察では、髄質のメラニン顆粒によって強められたスポンジ層からの青色構造色と皮質の黄色の色色素が融合して、緑色が作られているのが確認された(Fig.3F)。

以上のように、インコ羽毛の白色は髄質のマイクロバブル構造、黄色や橙色は皮質の色素、青色はスポンジ層のナノレベル構造、緑色はスポンジ層のナノレベル構造色と皮質の黄色色素の融合で作られていた。また、白色羽枝の髄質のマイクロバブル構造は近紫外線を、青色や緑色羽毛の髄質のメラニン顆粒は青色のナノレベル構造色を一層強く反射する機能を有することが明らかにされた。

参考文献

- 1) Yoshioka S and Kinoshita S: Effect of macroscopic structure in iridescent color of the peacock feathers. *Forma*, 17: 169-181, 2002.
- 2) Siefferman L and Hill GE: Structural and melanin coloration indicate parental effort and reproductive success in male eastern bluebirds. *Behav Ecol*, 14: 855-861, 2003.
- 3) Shawkey MD, Balenger SL, Hill GE, Johnson LS, Keyser AJ and Siefferman L: Mechanisms of evolutionary change in structural plumage coloration among bluebirds (*Sialia* spp). *J R Soc Interface*, 3: 527-532, 2006.
- 4) Masello JF, Lubjuhn T and Quillfeldt P: Is the structural and psittacofulvin-based coloration of wild burrowing parrots *Cynoliseus patagonus* condition dependent? *J Avian Biol*, 39: 653-662, 2008.
- 5) Taysom AJ, Stuart-Fox D, Cardoso GC: The contribution of structural-, psittacofulvin- and melanin-based colouration to sexual dichromatism in Australasian parrots. *J Evol Biol*, 24: 303-313, 2011.
- 6) Tinbergen J, Wilts BD and Stavenga DG: Spectral tuning of Amazon parrot feather coloration by psittacofulvin pigments and spongy structure. *J Exp Biol*, 216: 4358-4364, 2013.
- 7) Riedler R, Pesme C, Druzik J, Gleeson M and Pearlstein E: A review of color-producing mechanism in feathers and their influence on preventive conservation strategies. *JAIC*, 35: 44-65, 2014.
- 8) McGraw KJ and Nogare MC: Distribution of unique red feather pigments in parrots. *Biol Lett*, 1: 38-43, 2005.
- 9) 岡崎登志夫, 福山貴昭, 石野淳嗣, 堀井隆行, 川添敏弘: 紫外可視分光光度計を用いた動物被毛、羽毛の簡易吸光度分析. *生物試料分析*, 38: 139-145, 2015.
- 10) Lind O, Mitkus M, Olsson P and Kelber A: Ultraviolet vision in birds: the importance of transparent eye media. *Proc R Soc B*, 281: 2132209, 2013.