

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 27 日現在

機関番号：72641

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23770094

研究課題名(和文) 色彩の進化生物学—マルチスペクトル画像とパターン認識工学を用いた革命的アプローチ

研究課題名(英文) Evolutionary Biology of Coloration. A revolutionary approach using multispectral imaging and pattern recognition engineering.

研究代表者

山崎 剛史(YAMASAKI TAKESHI)

公益財団法人山階鳥類研究所自然誌研究室・研究員

研究者番号：70390755

研究成果の概要(和文)：本研究ではデジタル画像の技術を用いて生物の色彩の特徴を定量化する新たな手法を開発した。従来のデジタルカメラによる測色は、通常、可視光領域の波長情報をわずか 3 つの帯域に分けて記録するものにすぎないが、新手法は紫外光から可視光の領域を最大 401 バンドで記録することができる。この方法は生物の色彩進化の研究に革命的進展をもたらすと期待される。

研究成果の概要(英文)：I have developed a new method to quantify coloration of organisms with digital imaging techniques. Conventional colorimetry using digital cameras usually subdivided the visible spectrum into only three bands (RGB), whereas the new method can make 401-band images in the maximum resolution, which record wavelength information from the ultraviolet to the visible region. This new method is expected to lead to revolutionary advances of studies of evolution of coloration.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：基礎生物学 生物多様性・分類

キーワード：色彩 進化 測色 マルチスペクトル画像

1. 研究開始当初の背景

生物の体表面に見られる色と模様は、ダーウィンやウォレスの時代から常に進化生物学者を魅了してきた。隠蔽色、擬態、あるいは性選択など、カラーパターンに関係する研究テーマは多岐にわたっているが、こうした問題を科学的に研究するには、色彩の定量化が不可欠である。初期の研究では、カラーチャートによるスコアリングのように、観察者たる人間の眼を利用する方法が用いられていたが、その後の研究の進展により、生物のなかにわれわれをはるかに凌駕する視覚の持ち主がいることが明らかになったため、こうした手法は次第に用いられなくなってき

た。現代の進化生物学では、定量化技術のスタンダードとして、接触型スペクトロメーターやデジタルカメラといった光学機器が台頭し、人間の視覚への依存が排除されるようになった。その結果、色彩の進化生物学は飛躍的な発展を遂げたのだが、研究例が蓄積するにつれ、これらの機器についても数々の弱点が目につくようになってきた。

接触型スペクトロメーターは現在最も頻繁に利用されている色彩定量化機材で、これを用いれば、多くの生物が知覚している紫外光・可視光領域の光(約 300-700nm)について、一定の波長間隔(例えば 1nm 刻み)で分光反射率を測定することができる。この機

材に見られる弱点とは、データを「点」として測定しなければならないという制約である。接触型スペクトロメーターは1回の操作で測定できる範囲が直径数ミリメートルととても狭く、「面」的な課題との相性が非常に悪い。例えば、生物の体表面全体の色を評価するには、ボディの全体から偏りなく、客観的に多数の「点」をサンプリングするという、実現がきわめて難しい問題にチャレンジする必要がある。再現性を担保するには相当の回数の反復測定が必要になるに違いない。

一方、デジタルカメラを用いた測色法は「面」を扱うことのできる技術なのだが、この手法では非常に粗いデータしか得られず、研究者の広範な支持を集めるに至っていない。例えば、デジタルカメラは、可視光領域の色をたった3つの数字の組み合わせ(R・G・B)で表現する。紫外部に感度のある紫外線カメラを用いたとしても、データは4次元(R・G・B・UV)にすぎない。接触型スペクトロメーターで同じ領域(紫外部+可視光300-700nm)を1nm刻みで測定した場合(これはごくふつうの測定間隔である)、色は401次元のベクトルであり、デジタルカメラとの表現力の差は一目瞭然である。

もし、接触型スペクトロメーターと同様の解像度で紫外光から可視光にかけての波長情報を記録でき、しかもデジタルカメラのように面としての情報の取得ができる新技術が開発できるとするならば、色彩の進化生物学にさらなる飛躍的発展がもたらされるに違いない。

2. 研究の目的

本研究は次世代の色彩の進化生物学のあるべき姿を世に示すことを企図して行われた。前述の背景をふまえ、接触型スペクトロメーターとデジタルカメラの長所のみをあわせ持つ新しい生物色彩定量化技術を開発し、それを進化生物学の問題解明に活用することが目標である。

具体的には、異分野である工学分野から最先端の測色法であるマルチスペクトル画像技術を借用し、それを進化生物学の研究内容に合わせてチューンナップすることを課題として設定した。また、得られた画像データに対して多変量解析法やパターン認識工学の技術を適用することで、進化生物学の研究に役立つ色彩指標を導出することをもう1つの課題とした。

3. 研究の方法

工学分野で近年発展を遂げているマルチスペクトル画像技術を進化生物学の研究にマッチしたものにチューンナップするという本研究の第一の目的を効率よく果たすため、研究対象となる生物群を具体的に決めてケーススタディを実施することにした。これにより、マルチスペクトル画像技術を進化生物学の課題に適用する際の問題点を具体的に洗い出し、その解決策を検討することが可能となる。

ケーススタディの対象に選んだのは、色彩の多様性に富み、系統関係や生態情報などの周辺情報がよく整備された単系統群—現生鳥類—である。被写体としては、博物館等の研究機関に保管されている剥製標本を用いた。

工学分野ではマルチスペクトル画像の作成方法として「前分光方式」と「後分光方式」の2つの手法が開発されている(後述)。本研究では、両方の方式について、博物館標本の撮影を実際に行い、メリットとデメリットの相対的評価が行われた。

後分光方式によるデータの作成には白色光源と既存の液晶チューナブルフィルタが用いられた。

一方、前分光方式については、以下のような手法でデータの作成が進められた。まず、暗幕を用意し、その中に被写体、光源、冷却 CCD カメラ、波長校正用機材を設置する。このうち光源は紫外光から可視光までの領域の単色光を発することができ、波長の指定は1nm刻みで行えるものを準備した。冷却 CCD カメラは可視光領域だけでなく、紫外光にも感度を持つものを用いた。なお、波長校正用機材の詳細は特許権取得の問題があるため、ここでは割愛する。

前分光方式については、後述の通り、蛍光の発生が問題となる。そこで、前分光方式のデータ作成については、多数のシャープカットフィルタを用意し、照射中の波長の光以外(すなわち蛍光)が CCD カメラに届かない状態にして撮影を行う対策を施してみた。これは技術的には前分光方式と後分光方式がミックスされたことを意味する。

最後に、このようにして作成されたマルチスペクトル画像データを統計解析ソフトウェア SAS9.3 で解析した。ある被写体が n 個の画素で表現されており、各画素の波長情報が k 個のバンドで記録されているとすると、

この被写体の色彩情報はk次元ベクトルn個の集合体で表現できる。このデータに対して各種多変量解析法、パターン認識工学の手法を適用することで、色彩の特徴を要約して表す指標の開発が進められた。

4. 研究成果

工学分野ではマルチスペクトル画像の作成法として大きく分けて2つの手法が開発されている。一方は「前分光方式」とよばれるもので、単一波長の光を照射光とし、その波長を連続的に変化させることによって、被写体の分光反射率データを取得する。もう一方の手法は「後分光方式」と名付けられており、この場合、照射光は太陽光のような複数の波長の光の混合であって不変だが、受光部に設置したフィルタの感度を連続的に変化させることにより、同様のデータの作成を進める。

工学分野では後分光方式の方がメジャーだが、この方法を進化生物学の研究に活用するには大きな問題がある。それは光が与える標本へのダメージの問題である。後分光方式のデータ取得には太陽光のような強い光を被写体に当て続けることが必要となるが（下図参照）、これは半永久的な資料の保存を目標にかかげる博物館標本にはあまり適さな



い。そこで、本研究ではマルチスペクトル画

像の作成法として基本的に前分光方式を採用する方針を立て、外部の研究者の協力も得て撮影装置の開発を進めた。

完成した博物館標本用の前分光方式マルチスペクトル画像撮影機材は、暗幕内に設置された可変波長の微弱光発生装置を光源としている（下図参照）。なお、この光源は紫外光・可視光の領域（300nm～700nm）の光を1nm刻みで出せるため、この機材は最も高精度の設定では401次元の色彩データを面として作成することが可能である。



その後、この機材を用いて博物館標本の色彩定量化を進めるうちにクリアすべき新たな課題が浮かび上がってきた。それは蛍光の問題である。蛍光とは、特定の波長の光を照射した結果、それによる電子の励起が起きて別波長の光が発生する現象のことだが、これは前分光方式の測色にとって致命的な問題である。予備解析の結果、鳥類の体色には無視できないレベルの蛍光が含まれることがあることが分かってきたため、この問題の解決を期すため、受光部に各種のシャープカットフィルタを差し込むことにより、照射した単色光以外の光がデータとして記録されることを防ぐ改良を機材に施した。これにより、私たちの開発した撮影装置は「前分光方式と後分光方式の両方を用いた”ハイブリッド機”として完成するに至った。

次にこの新機材を用いて得られた色彩データによる進化生物学的研究の一例として、鳥類の「派手さ」「地味さ」を客観的に表す指標の導出が行われた。撮影時間の制約から、この研究には401次元の最高精度の色彩データではなく、21次元のデータが用いられた。この場合、もしある一つの標本が合計n個のピクセルで表されているとするなら、その標本が持つ色彩の多様性は21次元色彩空間中のn個の点の空間的広がりによって表現されるはずである。そこでこれらの点についてその重心からのずれの総和を基本に「派手さ」

指標の作成を進めた。なお、その際、鳥類の視細胞の感度特性にも注意を払った。今後は、「派手な鳥」と「地味な鳥」の出現率が地理的にどのように変化しているか、そのグローバルな地理的変異のパターンを世界ではじめて客観的に解明すること、(2) 発見されたパターンの解釈を試みることの2点を目標にデータのさらなる集積と解析を進めていく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計2件)

(1) T. Yamasaki, G. Morimoto, H. Matsubara and Keisuke Ueda. Avian Data in a Biomimetic Database. Joint Symposium of International Symposium on "Neo-Biomimetic Engineering IV" and Satellite Meeting of the 9th SPSJ International Polymer Conference (IPC2012) Part II. 10th Dec 2012. Kobe University, Kobe, Japan.

(2) 山崎剛史 色彩の進化生物学—鳥類標本コレクションがもたらす新知見. 山階鳥類研究所創立70周年記念シンポジウム「鳥の魅力を負う人びと」. 2012年9月23日. 有楽町朝日ホール, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 剛史 (YAMASAKI TAKESHI)

研究者番号 : 70390755

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :