

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：10105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26440204

研究課題名(和文) 鳥類の機能形態学的多様性と適応進化

研究課題名(英文) Diversity of functional morphology and adaptiogenesis of birds

研究代表者

佐々木 基樹 (SASAKI, Motoki)

帯広畜産大学・畜産学部・教授

研究者番号：50332482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、6種のペンギンの羽根の構造を肉眼的、そしてSEMを用いて微細構造学的に観察した。さらに、フクロウの趾の動態をCTによって解析した。ペンギンの羽根の解析では、各種とも正羽、綿羽、準綿羽、そして糸状羽が確認され、無羽区は存在しなかった。正羽は頭部、体幹、フリッパーに、綿羽は頭部、体幹、フリッパーの上腕部で観察された。また、糸状羽は頭部や体幹に認められた。フリッパーでは扁平な羽軸をもった正羽が密に分布し鱗状に配列していた。フクロウの趾の解析では、通常は三前趾足の形であったが、第四趾だけは掌側面を内側に向けていた。そのため、足根関節を屈曲させたとき第四趾は内側方向へと屈曲した。

研究成果の概要(英文)： In six species of penguins, the structure of feathers was examined by gross-anatomy and microstructural observation using SEM. In the digits of Owls, moreover, the dynamics was analyzed using CT scanner. In the examination of penguin feathers, contour, down, semiplumes and filoplume feathers were identified, and there are no apteria in all penguins. The contour feathers were recognized in the trunk and flipper. The down feathers appeared on the head, trunk and brachial parts of flippers, and the filoplumes was noticed in head and trunk. In the flippers, contour feathers with the flat rachis were densely distributed and indicated the scale-like arrangement. In the Owl digit analysis, the digits showed anisodactylous. However, the forth digit directed the palm side into the medial direction. Therefore, when the tarsal joint was flexed, the forth digit was moved into the medial direction.

研究分野：生物学

キーワード：ペンギン フクロウ CT 走査型電子顕微鏡 羽根 対趾足

### 1. 研究開始当初の背景

鳥類の一般形態学的解析は多数なされているが、鳥類の潜水適応や把握・支持機構などを機能形態学的に調べた報告は数少ない。鳥類後肢の趾における把握様式(趾型)には、三前趾足、対趾足、合趾足、変対趾足などが知られており、一般に鳥類は第二趾から四趾までを前方に、第一趾を後方に配置する三前趾足が主流である。猛禽類では三前趾足がほとんどであるが、フクロウはこの三前趾足と第四趾を第一趾と同様に後方へと配置する対趾足を状況に応じて使い分けている。しかし、この趾の可動性や機能形態学的な意義は全く知られていない。

また、潜水遊泳するペンギンの羽の微細機能形態学的解析は詳細には行われておらず、羽の微細構造と潜水遊泳適応との関係はいまだ不明の点が多い。

### 2. 研究の目的

本研究では、これまで骨の関節面の形状から推測するしかなかった関節の可動域を、CTを用いて非破壊的に解析することによって、フクロウの後肢骨格の形態機能学的適応を考察することを目的としている。さらに、ペンギンのように形態学的に高度に特殊化した鳥類の羽を、微細構造学的に解析し、潜水機能に対する羽の形態学的意義を明らかにすることも目的の一つである。また、機械ロボット工学(生物模倣: バイオミミクリー)などへの研究成果の応用のために、汎用性の高いデジタルデータをストックすることも重要な目的である。

### 3. 研究の方法

後肢骨格の非破壊的解析では、冷凍保管してある三前趾足/対趾足型の猛禽類であるフクロウを用いた。まずフクロウの趾を何も力を加えない状態でCT撮影を行ない、次いで三前趾足や対趾足に可動させて撮影を行った。その際第四趾の最大可動範囲を検索した。さらに何も把握させない状態で、踵を屈したときの腱固定効果による趾の可動状況も同様に観察した。また、実際にフクロウが獲物を捕獲する際に使用する趾型である対趾足型でプラスチックパイプを把握させ、腱固定効果を利用して趾を屈曲させた。そして、その時のパイプにかかる各四本の趾のベクトルを解析し、獲物を捕獲したときの機能形態学的考察をおこなった。

ペンギンの羽根の解析では、フンボルトペンギン、ミナミイワトビペンギン、マゼランペンギン、キングペンギン、フェアリーペンギン、ケープペンギン計6種のペンギンの羽根の構造を肉眼的、そして走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて微細構造学的に観察した。

### 4. 研究成果

(1) フクロウの趾の解析では、趾を固定せず力を加えない状態では、第一趾が後方を、

それ以外の趾が前方を向く「三前趾足」の形になっていた(図1左)。しかし、第四趾は掌側面を内側に向けていた。足根関節を屈曲させた場合、全ての趾は掌側面へ屈曲した。そのため、第四趾だけは内側方向へと移動した(図1右)。また、フクロウの第四趾は前後方向に180°近くの可動範囲を示した(図2)。また、対趾足型でパイプを把握させたとき、腱固定効果によって通常は第四趾だけが内側方向に移動することから、パイプには内側前背側方への力が加わっているものと推測される(図3)。

ことから、前後方向の力に加えて内側前背側方向への力が第四趾により加えられ、左右の趾で把握した獲物をその前方向にねじ曲げ、しっかりと固定して不動化することができると推測される。本研究で確認されたフクロウの特徴的な趾の可動性は、弱い光の環境といった視界の不明瞭な条件下において獲物への接触効率を上げ、さらに把握した獲物を逃がさず確実に確保する、いわゆる狩猟の成功の確率を向上させるための適応進化の結果としてもたらされたのかもしれない。

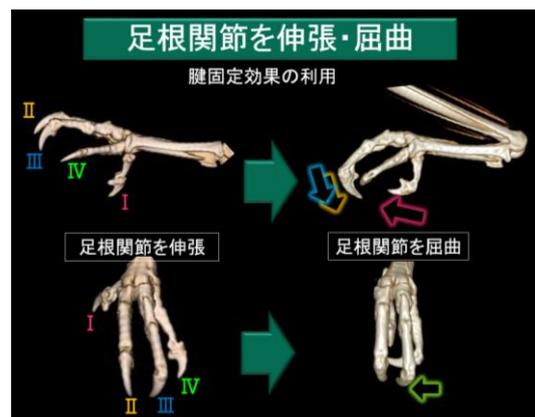


図1. フクロウ後肢端の趾の可動性

左: 踵の屈曲前(伸張状態)の趾の状態、右: 踵を屈曲させたことによる腱固定効果にともなう趾の動き。

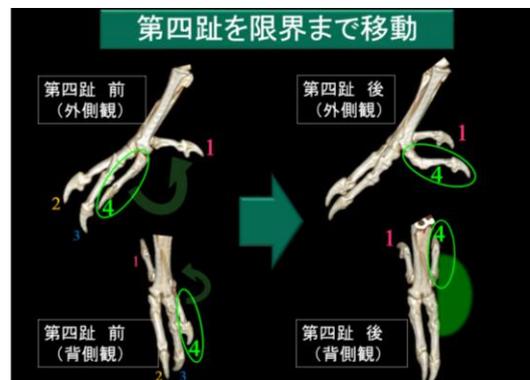


図2. フクロウ第四趾の前後方向への可動状況

左: 第四趾を可能な限り前方へ移動した状態、右: 第四趾を可能な限り後方へ移動した状態。

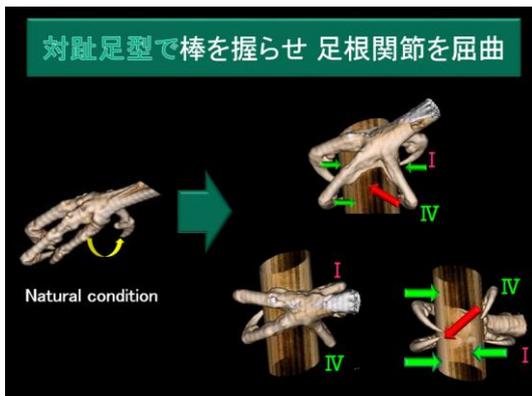


図 3. フクロウ後肢の対趾足によるパイプの把握状態と第四趾がパイプに加える力の方向

(2) ペンギンの羽根の解析では、各種とも正羽、綿羽、準綿羽、そして糸状羽が確認され、無羽区は存在しなかった。正羽は頭部、体幹、フリッパーに存在していた。準綿羽は各種とも尾腺部分でのみ観察された。綿羽は頭部、体幹、フリッパーの上腕部で観察された。また、糸状羽は頭部や体幹に認められた。

フリッパーでは扁平な羽軸をもった小さな正羽が密に分布し、鱗状に配列していた(図 4)。これら多数の扁平で小さな正羽で自身を覆うことでフリッパーに滑らかな表面を作り出しており、水中遊泳時に水の抵抗を減少させていると考えられる。また、フリッパーの羽軸根の長さは後部の方が前部よりも長かった(図 4A)。後羽はフリッパー上腕部で観察され、前腕部には観察されなかった(図 4B)。さらに、フリッパーの羽軸には溝(腹側溝)が形成されていた(図 5)。

尾羽はそれぞれの種で数は異なっており、その羽根は非常に強固であった。体幹の正羽よりも長く硬い羽軸、長い羽軸根を持っており、二足姿勢の補助をしていると考えられる。尾羽にはフリッパーの正羽と同様に羽軸の腹側に明瞭な腹側溝が認められ、キングペンギンで最も発達していた(図 6)。このフリッパーや尾羽に認められる腹側溝(腹側隆起)は、これらの羽根の羽軸に対して、それぞれ水圧や体重負荷に対する強度を与えていると推測される。

頭部、体幹の正羽は、羽軸、羽軸根、羽枝、小羽枝、後羽により構成されており、羽弁は正羽部、綿毛部、開放正羽部からなっていた。正羽部では鉤状小羽枝と弓状小羽枝が認められ、鉤状小羽枝は隣り合う弓状小羽枝を覆っているが、キングペンギンでは隣接する弓状小羽枝だけでなく、隣の鉤状小羽枝も覆っていた。その結果、キングペンギンの羽根は他のペンギンの羽根よりも強固な羽弁の形成と高い撥水性を持っていると推測される。

調べた全ての種のペンギンの羽根において、水中遊泳や保温に適応した特徴が認められ、若干の違いは認められるものの、基本的にはその形態は大変に類似していた。

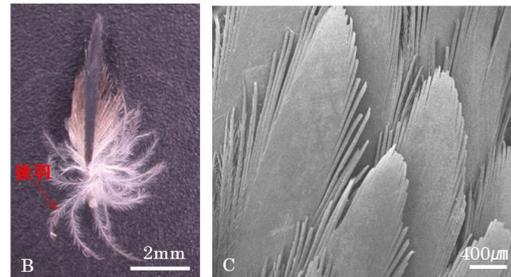
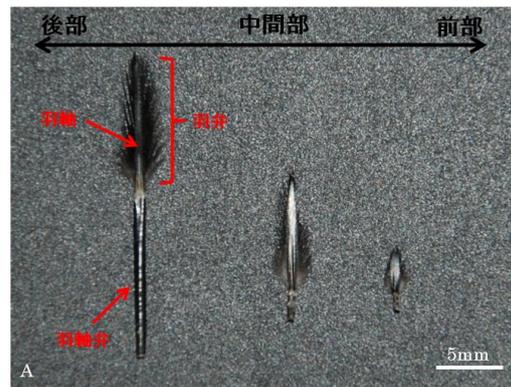


図 4. ペンギンにおけるフリッパーの羽根の構造

A: フリッパー前腕部の前部から後部に至る羽根、B: フリッパー上腕部の羽根、C: フリッパー前腕中間部の羽根の SEM 像。

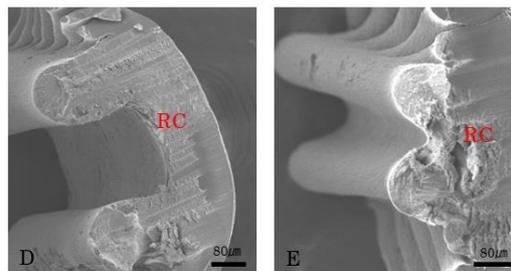
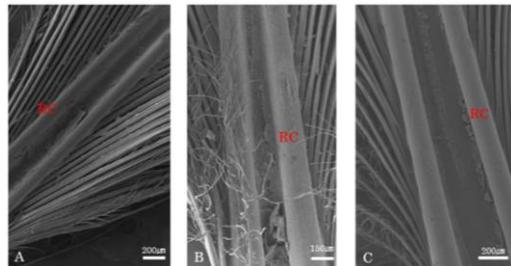


図 5. ペンギンにおけるフリッパーの正羽羽軸の SEM 観察像

A: フェアリーペンギン(腹側観)、B: ケープペンギン(腹側観)、C: キングペンギン(腹側観)、D: キングペンギン羽軸基部の断面、E: キングペンギン羽軸先端部の断面。RC: 羽軸。

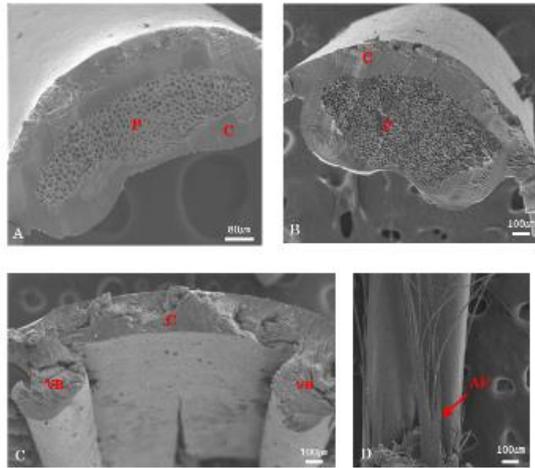


図 6. ペンギンにおける尾羽の正羽羽軸の SEM 観察像

A: フェアリーペンギンの羽軸の断面、B: ケープペンギンの羽軸の断面、C: キングペンギンの羽軸の断面、D: フェアリーペンギンの尾羽後羽、AF: 後羽、C: 皮質、P: 髄質、VR: 腹側隆起。

近藤 大輔 (KODOH, Daisuke)  
帯広畜産大学・畜産学部・助教  
研究者番号：90708364

(3) 連携研究者  
なし

(4) 研究協力者  
なし

## 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)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐々木 基樹 (SASAKI, Motoki)  
帯広畜産大学・畜産学部・教授  
研究者番号：50332482

### (2) 研究分担者

遠藤 秀紀 (ENDO, Hideki)  
東京大学・総合研究博物館・教授  
研究者番号：30249908

山田 一孝 (YAMADA, Kazutaka)  
麻布大学・獣医学部・教授  
研究者番号：80292093