

鳥の羽ばたき推進力の指標を確立 ～恐竜から鳥類へ、羽ばたきの起源を推定～

【本研究のポイント】

- ・鳥類の飛翔には、揚力^{注1)}を生むための翼の他に、羽ばたき運動による推進力が必要。
- ・恐竜^{注2)}から鳥類への進化において、推進力としての羽ばたき運動がいつ頃行われるようになったのかは、まだ明らかになっていない。
- ・鳥類の烏口骨（うこうこつ）^{注3)}は、羽ばたき運動を行うための強力な筋肉が働くときに、骨を変形させようとする力に対して、折れないように耐えている骨。羽ばたき能力のある鳥類は、羽ばたき運動による筋肉の動きに耐えるために、十分な強度の烏口骨を持っているはずである。
- ・現生鳥類 209 種の烏口骨を強度計測すると、鳥類の羽ばたき方の違いを反映していることがわかった。恐竜から鳥類への進化の過程で、羽ばたき飛翔が始まった時期を、より確からしく推定できる可能性がある。

【研究概要】

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学環境学研究科博士後期課程学生の明田 卓巳と名古屋大学博物館の藤原 慎一 講師は、鳥類の烏口骨という骨の折れ曲がりにくさ（強度）が、鳥類の多様な羽ばたき方を反映していることを示しました。

鳥類が飛翔するには、揚力を得る翼をもつことが条件のひとつですが、羽ばたきによって推進力を得る能力も重要な条件になります。恐竜から進化する過程で、いつから翼を羽ばたかせ、飛翔に用いるようになったのかは、いまだ解明されていません。

本研究では、現生の鳥類 209 種の烏口骨の強度（断面係数）の計測により、羽ばたき能力のある鳥類が、ない鳥類に比べて烏口骨の強度がはるかに大きいことがわかりました。さらに、鳥類の様々な羽ばたき方に合わせて、烏口骨の強度も多様に変化することもわかりました。このことから、烏口骨の断面係数が、羽ばたき能力の指標となることが明らかになりました。また、この指標を用いれば、恐竜から鳥類への進化の、羽ばたき運動の起源を解明できるかもしれません。

この研究成果は 2022 年 11 月 16 日午後 2 時（日本時間）付イギリス科学雑誌「Journal of Anatomy」オンライン版に掲載されました。

【研究背景と内容】

鳥は飛ぶとき、なぜ羽ばたいているのでしょうか。翼を羽ばたかせて飛ぶことを「羽ばたき飛翔」といいます。鳥は、翼をもっているだけでは飛ぶことができません。翼が揚力を得るためには、推進力が必要なのです。空中で翼を広げているだけでは、いずれは空気抵抗により失速し、体重を支えきれず落下してしまいます。飛行機では、ジェットエンジンやプロペラが推進力となり、揚力を得て機体を浮かせていますが、鳥では、羽ばたくことで、体を進行方向に向かわせる推進力を得ています。そのため、鳥類が飛ぶためには、羽ばたき運動が必須になります。さらに鳥類では、羽ばたきによって得られる推進力が別の移動手段に用いられる場合があります。例えば、ペンギンやウミガラスなどは、水中で羽ばたくことで推進力を得て自由自在に泳ぎ回ります。また、まだ飛ぶことができない鳥のヒナが、羽ばたきを行うことで、後肢を使って歩くだけではとても登れない鉛直に切り立った斜面を登ることが、多くの事例で確認されています。このことから、力強い羽ばたき運動の獲得は、鳥類の進化において、さまざまな移動手段で推進力を得るための重要な運動であり、鳥類が様々な環境へ適応・放散するのに大きな役割を担ったといえます。では鳥類は、この力強い羽ばたき運動をいつから行えるようになったのでしょうか。

鳥類は、恐竜から進化したと考えられています。そして、恐竜から鳥類へと進化していく途上のどこかで、揚力を得るための翼と、推進力を得るための羽ばたき能力を獲得していったことが予想できます。化石記録から、翼を獲得していく進化の様子は明らかになりつつあり、鳥類が出現する以前に、前肢に伸長した羽毛が集まり、翼が形成されるグループが出現しています。翼は、鳥類に系統的に近づいていくほど大きくなり、翼の形も鳥っぽいものに近づいていく傾向にあります。その一方で、**推進力としての羽ばたき運動がいつ頃行われるようになったのか**は、まだ明らかになっていません。化石種の羽ばたき能力を復元するには、化石に残る骨から情報を得る必要があります。これまでの研究では、主に肩関節の形状や胸部骨格の形態から、化石種の羽ばたき能力の推定が試みられてきましたが、どちらかというとなり定性的な指標であり、数量を用いた定量的な指標とは言えなかったため、正確な羽ばたき能力の復元には至っていません。

鳥類の胸部骨格には、体幹と翼の根本をつなぐ骨—烏口骨（うこうこつ）—があります（図 1）。本研究では、鳥類の羽ばたき能力の新たな指標として、烏口骨の強度に着目しました。鳥類の羽ばたき運動は、主に翼の打ち上げを担うササミ（烏口上筋）と、翼の打ち下ろしを担う胸肉（胸筋）が交互に収縮することで行われます。これらの筋肉は、どちらも胸部骨格から始まり、翼の付け根である上腕骨へくっつきます。鳥類が羽ばたいている間、ササミと胸肉は繰り返し収縮するため、そのたびに翼を胸部骨格の方へ引きつける力が働きます。このとき、烏口骨は「突っ張り棒」の役割を果たし、力強い筋肉が骨を曲げようとする負荷に耐え続けています。そのため、羽ばたき能力のある鳥類の烏口骨は、羽ばたき運動による筋肉の動きに耐えるだけの十分な強度を持つと考えられます。

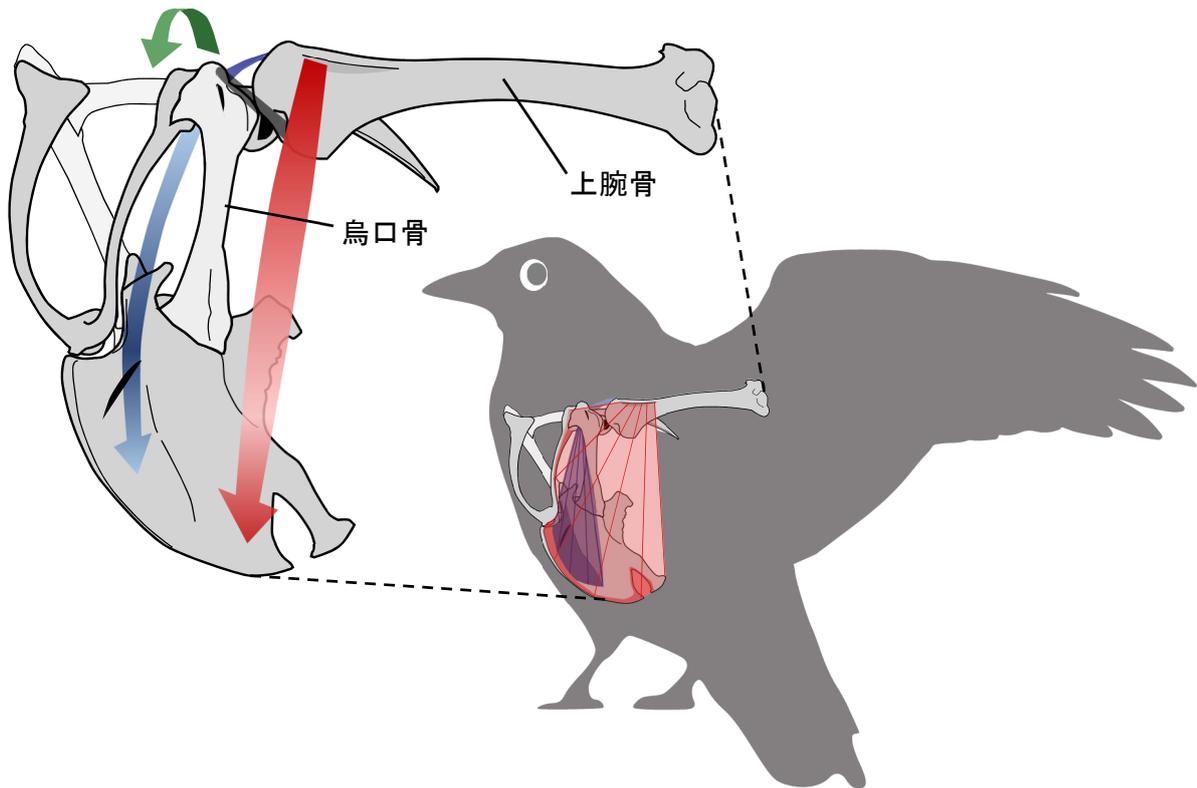


図 1. 鳥類の胸部骨格を、左頭側から見た図。胸肉による力（赤色の矢印）とササミによる力（青色の矢印）により、烏口骨は背腹方向に曲げられる（緑色の矢印）。

本研究では、柱状構造の強度を示す代表的な値として、断面係数を用いました。これは、柱状の構造の断面形状に依存する値で、柱状の構造を曲げようとする力にどれだけ耐えられるか、すなわち、骨の強度を評価するのに用いられます。鳥類 209 種 220 個体の標本を調べ、体重に対して烏口骨の強度がどれだけ強いかを比較したところ、鳥類の羽ばたき方の違いを反映していることがわかりました（図 2）。

まず、羽ばたき能力のある鳥類では、羽ばたき能力をもたない鳥類に比べて、烏口骨の断面係数強度が有意に大きいことがわかりました。これは、鳥類が翼の力強い羽ばたきによって自身を推進させるためには、十分な強度の烏口骨が必要であることを示しています。

さらに、鳥類の様々な羽ばたき方に合わせて烏口骨の強度も変化することもわかりました。例えば、アホウドリやコンドルのように頻繁に滑翔^{注4)}する鳥類は、羽ばたき飛翔する鳥類よりも烏口骨の強度が高いことがわかりました（図 2）。彼らは、胸部骨格や上腕骨の形態により、他の鳥類に比べ、羽ばたき筋による力の向きが、より内側に向いている傾向にあります。この力の向きの変化は、烏口骨にかかる曲げの負荷を増大させます。この負荷の増大が、滑翔する鳥類の烏口骨の強度を高める要因の一つになったと考えられます。

また、ペンギンやウミガラスのような水中遊泳^{注5)}を行う鳥類の烏口骨は、羽ばたき飛翔する鳥類のそれと同様の強度を示すこともわかりました（図 2）。水は空気の約 800

倍の密度であるため、水中で推進するには、より強い力で羽ばたく必要があります。一方彼らは、遊泳時のみ翼を折りたたんだり、進化でヒレ状の小さな翼を獲得したりすることで、翼にかかる抵抗を減らしています。そのため、体サイズが同じである場合、水中遊泳する鳥類と羽ばたき飛翔する鳥類では、羽ばたく力は結果的に同様であることが予想されます。水中遊泳する鳥類の鳥口骨の強度が、羽ばたき飛翔する鳥類と同様になったのは、このことが影響しているものと考えられます。

このように、鳥口骨の断面係数は、その鳥類の羽ばたき方をある程度反映しています。よって、鳥口骨の強度が、羽ばたき能力の強力な指標となることが示されました。

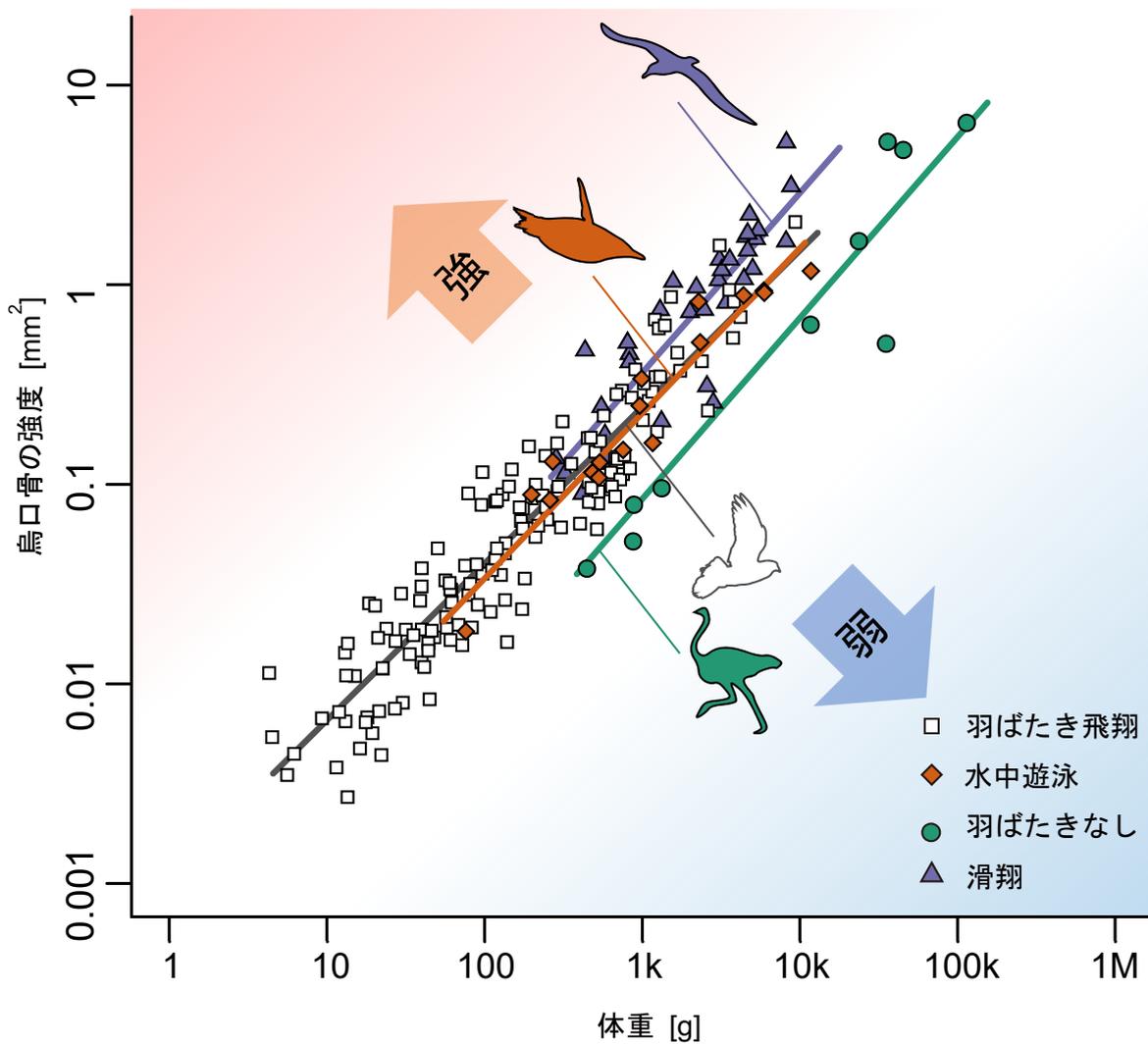


図2. 体重 (g) に対する鳥口骨の強度 (mm²) の散布図。左上ほど鳥口骨の強度が高く、右下ほど鳥口骨の強度が低い。

【成果の意義】

本研究で得られた指標は、化石鳥類の羽ばたき能力を、より確からしく復元する指標として有効だといえます。恐竜から鳥類へと進化する過程のどの段階で、力強い羽ばたき能力を得ることができたのか。本研究で得た新しい指標を用いてこれを明らかにすることができれば、鳥類の「羽ばたき飛翔」の真の起源を明らかにすることができるかと期待されます（図3）。また、コウモリや絶滅したは虫類である翼竜など、ほかの飛翔性の動物にも、羽ばたき運動による筋肉の動きに耐える骨があるはずなので、今回の研究の着眼点は、鳥以外の羽ばたき能力を評価する際にも、有効となるでしょう。

本研究は、2017年度から始まった日本学術振興会『科学研究費助成事業』（課題番号17K17794）の支援のもとで行われたものです。

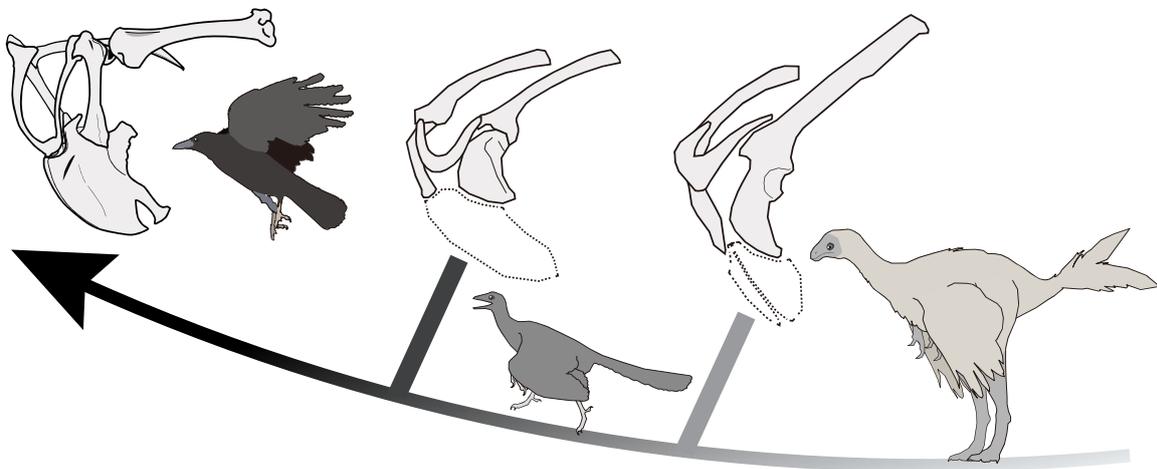


図3. 恐竜から鳥類への胸部骨格の進化の様子。

【用語説明】

注1) 揚力：

流体の流れによって生まれる力のうち、流れに対する鉛直方向成分のこと。

注2) 恐竜：

トリケラトプスとスズメの共通祖先と、その子孫たちのこと。ティラノサウルスや、ステゴサウルスなどがこれにあたるが、プテラノドンなどの翼竜は当てはまらない。

注3) 鳥口骨（うこうこつ）：

胸部を構成する骨格の一部であり、体幹と前脚（翼）の根本をつなぐ骨。は虫類、鳥類にみられ、ヒトにはない。鳥が羽ばたくときに使う主要な筋肉である、むね肉（胸筋）やササミ（鳥口上筋）が、鳥の骨格に力かける際に、その負荷を一身に受ける骨。

注4) 滑翔 :

上昇気流などの空気の流れを捉え、羽ばたかず、高度を保って飛翔すること。

注5) 水中遊泳 :

ここでは、前脚（翼）を用いた遊泳を行うことを指す。カワウのように、後ろ脚で遊泳を行う鳥類とは区別される。

【論文情報】

雑誌名 : Journal of Anatomy (John Wiley and Sons)

論文タイトル : Coracoid strength as an indicator of wing-beat propulsion in birds

著者 : Takumi AKEDA, Shin-ichi FUJIWARA

明田 卓巳 (名古屋大学大学院環境学研究科), 藤原 慎一 (名古屋大学博物館)

DOI : 10.1111/joa.13788

URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/joa.13788>