

「鳥の色・恐竜の色～なぜ恐竜の色を現代の鳥類の発色から検討できるのか～」

森本 元 (山階鳥類研究所研究員／東邦大学客員准教授)

恐竜と鳥の関係。これは近年の鳥学における大きな話題の一つである。まさか、この二つがここまで密接に関連することを、一昔前に誰が予想できたであろうか。しかし今では、鳥が恐竜の子孫だということを、道を歩く市民の多数が知っている。時代が変われば常識は変わるものだが、ここまで変化したことに、ただただ驚くばかりである。そして近年、羽毛恐竜が着目を集めている。一部の恐竜には羽毛があり、現代の鳥類の祖先が恐竜であったことが示されつつある。さらに最近の研究では、その恐竜達の色を推定する成果が発表され世間を沸かした。驚いた理由は、化石には色は付いていないからである。ではどのようにして太古の生物の色を推定できるのだろうか。その方法は、原生の鳥類の発色の仕組みから、同じ羽毛を持っていた恐竜達の色を推定する方法である。つまり、今では茶色い化石になってしまった恐竜の羽毛の色を、鳥から復元する試みといえよう。そのためには、まず、原生の鳥類の発色メカニズムを理解しなければならない。本講演では、鳥類の研究者である演者が、鳥類の羽毛の発色の仕組みの基本的な考え方を御紹介したい。

数十年前の恐竜の本を開くと、そこに描かれたイラストでは、恐竜達がヒトやゴジラのように二本足で垂直に立って尾を引きずるようにノッシノッシと歩いている。子供の頃にそうした恐竜図鑑を眺めながら疑問に思ったことがある。「なぜ恐竜の模様や色が描かれているだろう、どうやってわかったのだろう」と。そして子供ながらに、いろいろな本を読み進めるうちに、骨の上の皮膚や毛の色はまったく不明で、図鑑の色は学者の想像らしいと知り、ちょっと残念な気持ちになったことを覚えている。繰り返すが化石には鮮やかな色はついていない。どれも茶色、土の色、石の色である。しかし、鳥類研究と羽色研究の出会いが、色の無い恐竜の化石の色や模様を明らかにできる可能性を芽生えさせたといえよう。垂直な姿勢で鈍重だと考えられていた恐竜が、実は水平な姿勢で素早く動いていたと、研究が進むことで分かってきたように、鳥類の発色の研究もこの数十年で飛躍的に進歩したのである。

鳥類の色は主にカロテノイド色素やメラニン色素による「色素色」、または、色素によらない発色方法である「構造色」によって発色している。色素は羽毛の中にその成分が存在することによって色が決まる。たとえば、我々の髪の毛が黒いのは、髪の毛の繊維の中に黒いメラニン色素が入っていることによるものである。顕微鏡を使って羽毛内部を観察すると、こうした肉眼では見ることが出来ない小さな構造物の存在が確認できる。超微細構造が複雑な光の屈折や散乱を引き起こし特定の色を発する仕組みが構造色である。実は、こうした極小の構造物が、運良く化石として確認できることがある。化石の羽の中に残る超微細構造の構成やサイズなどを調べ、現代の鳥類の羽と照らし合わせることで、化石羽毛の色を推測するのである。

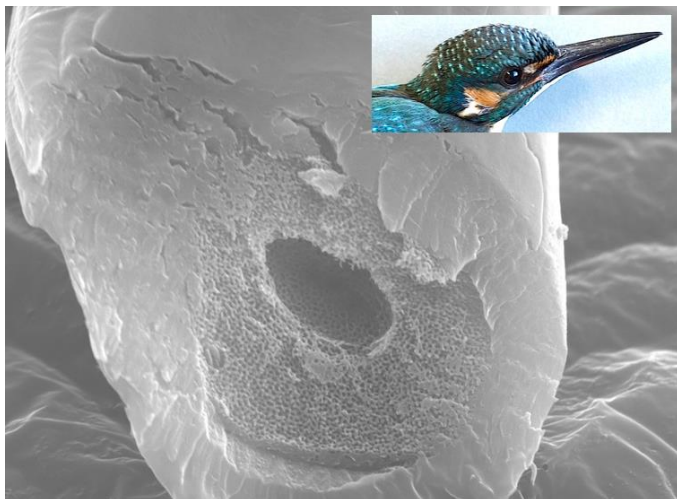


図 カワセミの羽毛の断面図と内部構造の電子顕微鏡写真。カワセミ（右上）の青色は羽毛の内部の微細構造による光学現象で発色する構造色。

恐竜の派手な見た目は何のため？鳥の雌雄差から考える角竜の進化

岡山理科大学 千葉 謙太郎

現在の鳥を思い浮かべたとき、色鮮やかな飾り羽を持つ鳥を想像する方も多いと思います。この鮮やかな飾り羽は、多くの鳥でオスがメスを惹き付けるのに用いられている、オスだけの特徴です。このようにオスとメスで体の特徴に違いがあることを性的二型と呼びます。

では、絶滅してしまった恐竜に性的二型はあったのでしょうか？体の色は多くの恐竜で未だ分かっていませんが、ステゴサウルスの背中板や、パラサウロフスのとさか、トリケラトプスの襟飾りなど、よく目立つ装飾を持つ恐竜が数多くいました。しかし、これらの装飾を持つ恐竜の性的二型に関しては、議論が続いており、未だ統一見解が得られていません。

白亜紀後期のカナダに生息していた角竜セントロサウルスも、襟飾りに二対の突起状の装飾を持っています（図1）。セントロサウルスは、体の小さいときには襟飾りに装飾を持たず、大きくなると装飾が発達します。ただし、大きな個体に見られる装飾の形には性的二型が見出されていませんでした。

これに対して、今回、骨の断面に観察される成長輪（図2）からセントロサウルスの年齢推定や成長様式を復元したところ、体が小さいにも関わらず、すでに成体になっている個体がいることが分かりました。この研究結果から、セントロサウルスには、体が小さく装飾を持たない成体と、体が大きく装飾の発達する成体という2つのタイプがあり、これが性的二型である可能性が示唆されました（図3）。

今後、骨の成長輪から年齢推定や成長様式の復元を行うことで、絶滅してしまった動物の性的二型の問題に迫ることができるかもしれません。

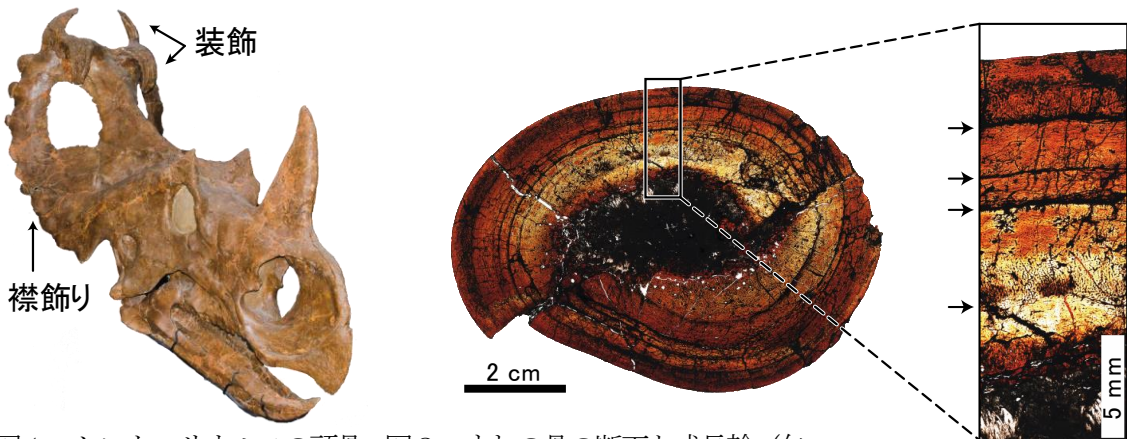


図1：セントロサウルスの頭骨 図2：すねの骨の断面と成長輪（矢印）

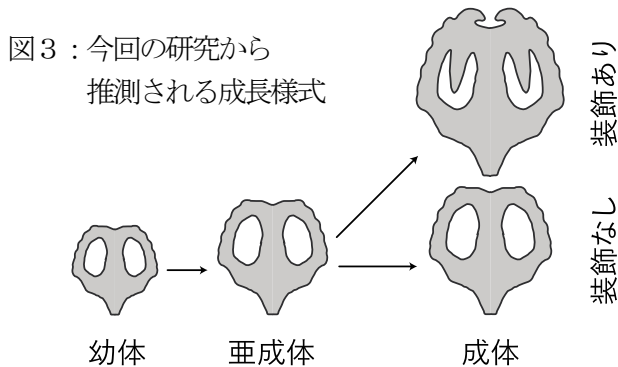


図3：今回の研究から推測される成長様式

海をめざした恐竜時代の鳥類

兵庫県立人と自然の博物館 田中公教

恐竜は中生代のあらゆる大陸に分布し、陸上の支配者として君臨した。ジュラ紀に翼を獲得し、白亜紀末の大量絶滅を唯一生き延びた獣脚類恐竜を、我々は現在、鳥類と呼んでいる。鳥類はこれまでに約10,000種が確認されており、陸上の脊椎動物では最も繁栄したグループだ。時速70kmで大地を疾走するダチョウ、高度10,000mのヒマラヤ山脈上空を渡るアネハヅル、大都会のビル群を巧みに飛び交うカラスなど、今を生きる恐竜たちは、地球上のさまざまな環境に適応して生活している。

鳥類のなかでも、ひとときユニークなカタチや生活様式をみせるのは「海鳥」である。上空40mから海面に飛び込み魚を捕らえるカツオドリや、600mを超える深さまで潜水するコウテイペンギンなどに代表される海鳥は、恐竜のなかで唯一、生涯の9割を海ですごす“海洋生物”として進化した。彼らは翼や後ろ肢などを特殊化させることで、水中を高速で移動することを可能とした。

恐竜は、中生代の陸地を約1億7,000万年間にわたって支配していたが、そのほとんどは陸地にとどまった。それでは、恐竜が海洋に進出しはじめたのは、いつごろなのだろうか？恐竜の海への進出は、羽毛を獲得し、小型化し、空への進出を始めた鳥類のグループで起こった。ジュラ紀のアーケオプテリクス（始祖鳥）は長い尾をもち、その後、鳥類は飛翔のために尾を縮小させ、短い尾と扇状の尾羽根を進化させた。また、安定した飛行を行うために前肢の親指にある羽根（小翼羽）を発達させ、大きな翼を作るための長い前肢、羽ばたきのための力強い筋肉を獲得し、より現代の鳥類に近い姿かたちとなっていった。このような優れた飛翔能力を進化させた鳥類のなかから、水辺をめざすものが徐々にあらわれ始めた。

白亜紀前期に出現したホンジャノルニスには長く伸長した後肢をもっており、現在のシギなどのように浅瀬や沼地などの水辺で生活していたことが伺える。また、ガンズスという小型のカモメほどの鳥類は、水中を泳ぐための長い後ろ脚や「水かき」を獲得した最初の鳥のひとつで、主に内陸の湖で生活していたと考えられる。この時代、力強い翼と水かきのある後ろ足で、空中と陸上、さらには水中を活発に行動できるという、それまでの鳥類にはない画期的な進化がおこった。

白亜紀の中頃、鳥類は本格的に海へと進出しはじめた。最古の海鳥はヘスペロルニス類というグループである。ヘスペロルニス類は、それまでの水鳥とは異なり、より骨太でがっしりとした後肢、長く伸びた脛の骨を獲得し、かかとから先で力強く水を蹴って素早く泳ぐことができる。この時代の海は、首長竜や魚竜などの大型爬虫類が支配していた。彼らから逃れるためや資源争いのため、水辺に適応した鳥類は、より潜水に特化したフォルムを進化させたのかもしれない。

白亜紀後期のヘスペロルニス類には、人間の背丈ほどにまで大型化し、翼を極端に小さくすることで完全に飛ぶことをやめてしまった種が出現した。彼らは空の生活を捨てる代わりに、緻密な骨格と大きな体格、強力な後肢の筋肉や特殊化した水かきを獲得し、潜水のための優れた機能を進化させた。海洋の環境にうまく適応したヘスペロルニス類は、白亜紀の北半球に広く分布し、多様化していたと考えられる。

中生代の海鳥は白亜紀末に多くの恐竜とともに絶滅し、現代型の鳥類のみがこの絶滅を生き延びた。現代型鳥類と非常に近いからだの構造や生理機能をもっていた中生代の海鳥が、なぜ絶滅してしまったのかは未だ謎が多い。本講演では、中生代、深い海をめざした恐竜・海鳥の進化の道のりを紹介する。

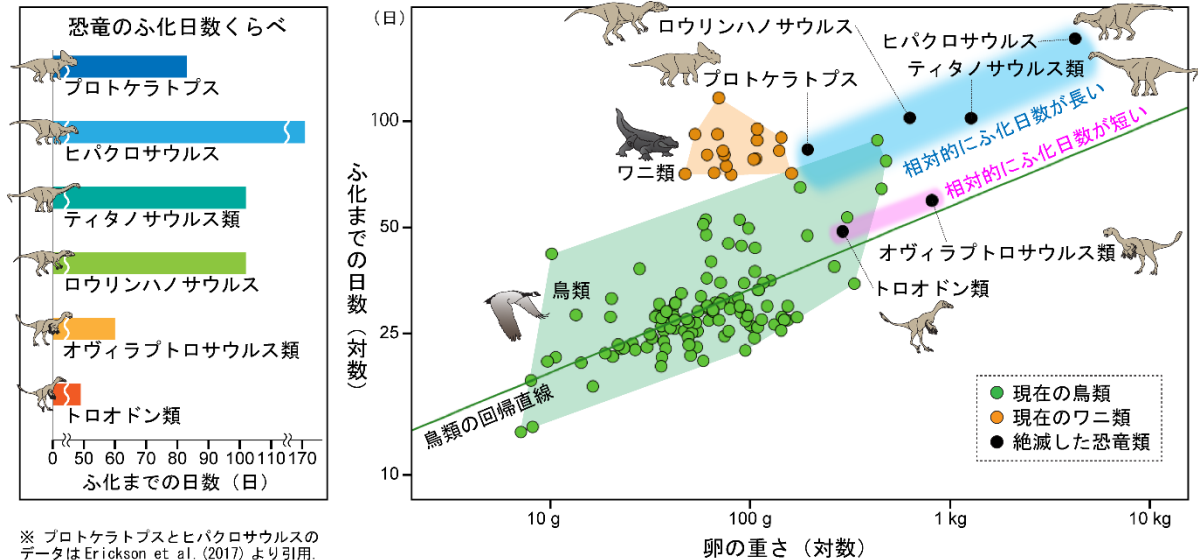
卵化石から探る恐竜の巣作り
名古屋大学博物館・日本学術振興会特別研究員 SPD 田中康平

恐竜の産卵や巣作りについて研究していると、一般の方から「恐竜の卵って、何日でふ化するの?」としばしば聞かれます。この質問に私はギクリとします。なぜなら、化石からふ化日数という「時間の概念」を見出すことは、簡単ではないからです。化石になった卵をどんなに温めても、もうふ化することはありません。すでに化石になった卵の、ふ化までの日数を割り出すことは、果たして可能なのでしょうか。

実は昨年、この難題に取り組んだ研究論文が発表されました。この研究では、卵の中の赤ちゃん(つまり、胚)化石の歯に残された成長輪を用いてふ化日数を推定しています。胚の歯には一日一本、木の年輪のように線が出来るので、この合計本数を使ってふ化日数を割り出そうというわけです。頭にえり飾りのあるプロトケラトプスでは83日、アヒルのような顔をしたヒパクロサウルスでは171日と計算されました。ただし、判明したのは2種の恐竜だけで、方法もやや複雑でした。広く恐竜の卵化石に用いることは出来ません。

そこで私たちの研究グループは、まったく別のやり方で恐竜たちのふ化日数を推定する方法を考えました。ふ化日数は、卵の重さや卵殻の多孔質など、様々な要因の影響を受けます。そのため、これらの要因を組み合わせるとふ化日数を推定する計算式(回帰モデルと言います)を作れば、精度良く恐竜たちのふ化日数が推定できるだろうというわけです。調査の結果、首が長くて体の大きな竜脚形類や、鳥類に近縁なオヴィラプトロサウルス類やトロオドン類のふ化日数は、50-100日程度と推定されました(下の図)。

これらの結果から、恐竜たちの子育て戦略が垣間見られます。私たちの研究で、鳥に近い系統の恐竜ほどふ化日数は短くなるのが分かりました。悪天候や天敵による巣づくりの失敗を減らすには、短いふ化日数の方が有利です。おそらく、天敵が多い過酷な環境の中で、恐竜たちはたくさんの卵を素早くふ化させる方法へと進化していったと考えられます。卵化石を調べると、恐竜たちの生きる工夫が分かるのです。



※ プロトケラトプスとヒパクロサウルスのデータはErickson et al. (2017) より引用。

分子生物学から恐竜を探る？ 江田真毅（北海道大学総合博物館）

分子生物学的手法で再生させた恐竜が躍動する「ジュラシック・パーク」「ジュラシック・ワールド」シリーズ。恐竜再生のために、琥珀に閉じ込められた蚊の腹部に溜まった恐竜の血液からDNAを採取し、欠損をカエルのDNAで補い、さらにワニの未受精卵に注入する手法が描かれている。この設定が現代に恐竜を復活させるという一見荒唐無稽な話にリアリティを持たせていると言えるだろう。

「ジュラシック・パーク」がヒットした1990年代以降、完新世（約12,000年前～現代）や後期更新世（約126,000～12,000年）の地層から出土した骨のDNAを分析する古代DNA解析の技術も飛躍的に進歩してきた。初期には細胞内に多数のコピーを有するミトコンドリアのDNAのごく短い配列を用いた絶滅生物の系統関係の推定が主な研究の対象であった。しかし、近年では122,000年前のネアンデルタール人のゲノム（全ての核酸上の遺伝情報）が決定され、私たちヒトの遺伝子の一部はネアンデルタール人からもたらされたと考えられることが分かった。さらに2018年8月にはネアンデルタール人の母とデニソワ人の父をもつ少女の骨が発見されたとのニュースももたらされた。

このような古代DNA解析技術の進歩は、一方で大変残念な事実も明らかにした。ニュージーランドにかつて生息した巨鳥、モア類の骨の研究では、塩基配列の断片化の速度が明らかになった。約8,000～600年前の地層から出土した骨の分析から、ミトコンドリアDNAの塩基配列の断片化は温度の高い環境に埋没した骨ではより早く進み、25℃では約22,000年後に、-5℃でも約683万年後には完全にバラバラになってしまうと予想された。さらに核DNAではその2～2.5倍の速さで断片化が進むと考えられた。恐竜の絶滅は約6,600万年前。蚊の腹部に溜まった恐竜の血液に分析できるDNAが残っている可能性はほとんどないと言える。

近年、化石の研究に利用できる分子生物学的手法として、骨中のタンパク質、とくにコラーゲンタンパク質を分析する方法が注目されている。タンパク質分析の利点として、1) DNAより保存性が高いため、より古い分子系統情報が得られること、2) DNA解析のように特定部位を人為的に増幅しないため、コンタミネーションの可能性が少ないこと、3) ごく少量の試料で分析できるため、試料をあまり破壊せず再現性が確認しやすいことなどが指摘されている。実際、コラーゲンタンパク質の分析は更新世に絶滅した生物の系統関係の推定のほか、遺跡から出土した微小な骨片の種同定にも近年盛んに利用されている。また2007年には約6,800万年前のティラノサウルス *Tyrannosaurus rex* で、2009年には約7,800万年前のブラキロフォサウルス *Brachylophosaurus canadensis* で化石に含まれるタンパク質の分析に成功している。さらに、得られたアミノ酸配列の現生生物との比較から、これまで化石の形態の研究から考えられてきたように恐竜はワニよりも鳥類とより近縁とする系統関係を支持するデータが示されている。

一方で、恐竜の化石に分析可能なタンパク質が残っているかどうかは、研究者の間でも議論が続いている。当初から、得られたタンパク質はバクテリアなどのもの、あるいは外部からのコンタミネーションによるものとの指摘があった。また恐竜のタンパク質が特定の研究グループでしか確認できない点も疑問視されていた。さらに、2017年には恐竜の化石から抽出されたコラーゲンタンパク質のアミノ酸配列は、すべて現生のダチョウ *Struthio camelus* にも同一の配列があることが指摘された。ダチョウはこの研究グループも分析しており、かなり旗色が悪くなっているのは否めない。

果たして、分子生物学から恐竜を探ることはできるのか？これまでの知見を整理する。

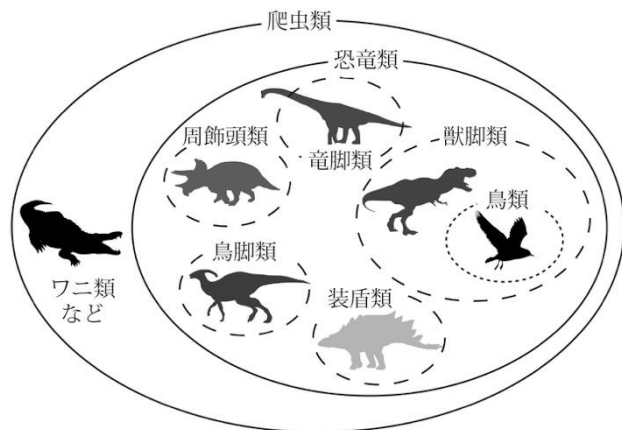
鳥の特徴を持つ鳥じゃない恐竜たち 北海道大学総合博物館 小林快次

鳥類は、獣脚類の一グループで、中生代の獣脚類から鳥類が進化した。以前は、鳥類と鳥類でない恐竜（非鳥類型恐竜）のギャップは大きくそれらの違いは明快であったと思われていたが、現在はそのギャップが次々と埋められ境界が曖昧になってきた。今回は、獣脚類の食性と翼に焦点を当て、鳥ではない恐竜が持つ鳥の特徴を紹介する。

獣脚類は一般的に肉食性をされている。しかし、獣脚類の進化に伴って食性は複雑に変化していく。肉食性から雑食や植物食性になるものが出現し、鳥類に近づくにつれ肉食でないものが増えていく。この変化が、後の鳥類が持つ食性の多様性へと繋がっていく。現在の植物食・穀物食の鳥類は、消化の補助のため胃に石を持ち、これを胃石と呼ぶ。獣脚類の恐竜にも胃石を持つものも多く見られているが、その量や大きさは現在の鳥類とは異なる。胃石は肉食性の恐竜にも見られ、飲み込んだ獲物を消化する手助けのために使われた可能性がある。胃石の獲得のため、より効率よく栄養を吸収できたと考えられ恐竜の活発な活動を支えることができた。鳥類へと進化する段階で、飛翔の妨げにならないように、恐竜はその胃石の量を減らしていった。一方で、胃石の維持により口内の消化を最小限に抑え、歯よりも軽い嘴を吻部に備えた。

鳥類の大きな特徴に、翼の獲得がある。現生鳥類のほとんどが、翼を飛翔のために使うが、非鳥類型の恐竜では翼は装飾や抱卵のために使われたと考えられる。獣脚類の代表格でもあるティラノサウルスの腕にも羽毛が生え、翼があった可能性が指摘されているが、その大きさは知られていない。しかし、手首の骨（手根骨）から見られる手首の曲がり具合を見ると、翼の大きさは小さかったと思われる。翼の拡大は、鳥に近い獣脚類（オヴィラプトロサウルス類やデイノニコサウルス類）から始まったと考えられる。オヴィラプトロサウルス類の拡大した翼は飛翔には向いておらず、抱卵に使われた可能性が高い。その後より進化したデイノニコサウルス類の中には、体全体を小型化し樹上へ生活を変え、滑空に近い飛翔を行うようになり、生活圏を地上から空中へを変えるものもいた。

これらからも伺えるように、非鳥類型の恐竜は段階を経て進化することで「鳥化」をしていったことがわかっている。恐竜の化石は、“爬虫類”から鳥類への大進化の過程を記録している貴重な研究題材であることが言える。



図：爬虫類の分類。鳥類が恐竜類であり、“爬虫類”であることがわかる。