

最古の鳥類の脳が語る

Lawrence M. Witmer

知られているうちで最古の鳥類である始祖鳥は、飛ぶための「正しい資質」を備えていたのだろうか。現代の進歩した技術でその頭蓋構造を調べたところ、恐竜から鳥類への移行と飛翔の進化について手がかりが得られた。

原文：Inside the oldest bird brain

Nature Vol.430 (619-620)/ 5 August 2004; www.naturejpn.com/digest

始 祖鳥(Archaeopteryx)は、たとえば恐竜ティラノサウルス・レックスほどの人気スターではないかもしれないが、象徴的な立場にあることには間違いない。始祖鳥は、鳥類のように羽毛のある翼と叉骨をもち、なおかつ、爬虫類のように歯のある顎と骨からなる長い尾もっており(図1)、ほぼ完璧な移行途中の形態である。化石が見つかったのは1859年にダーウィンが『種の起源』を出版してまもなくのことで、それ以降、始祖鳥は進化の強力な例証とされてきた。

鳥類とその飛翔能力の起源に関する議論でも、始祖鳥は主役となってきた。羽毛のある恐竜や太古の化石鳥類が中国で発見されて鳥類への移行について説明が進んだものの^{1,2}、ドイツ南部のジュラ紀石灰岩から掘り出された始祖鳥の骨格化石(1億4,700万年前のもの)は、今もって最古の鳥類化石そして最も原始的な鳥類化石であることに変わりはない³。始祖鳥化石は過去140年の間に実に多くの研究者によって精査されており、新たな知見はもう出てこないように思える。しかし、*Nature* 8/5号 p. 666でP Domínguez Alonsoたちが報告した記念碑的な研究成果⁴は、最初に発見された骨格標本を材料に、始祖鳥の脳と感覚器官について興奮を呼ぶようなデータを示している。この成果は、始祖鳥の、生物学にとっても進化における鳥類への移行問題にとっても大きな意味合いをもつ。

ロンドンにある自然史博物館の研究者たちは、始祖鳥が生きていたころに脳を納めていた頭蓋の部分を外に持ち出した(図1)。この脳頭蓋はヒトの小指の先端分節よりも小さいので、研究チームのリーダーであるA Milner女史は、これを入れた箱を安全のためブラウスのポケットにしまい、ロンドンから、高解像度のX線CTで解析できるテキサス大学オースチン校まで運んだ。そして研究チームは、脳の入っている頭蓋腔や内耳(平衡感覚や聴覚を担う器官)の薄い骨の内部をのぞき見た



図1 始祖鳥の「聖像」。これは1877年に発見された「ベルリン標本」で、現在はベルリンのフンボルト博物館に所蔵されている。Domínguez Alonsoたち⁴が今回調べた「ロンドン標本」はそれより前(1861年)に発見され、頭部が胴体と分かれているが、脳を包む頭蓋部分が細かいところまで非常によく保存されている。



図2 鳥並みの頭脳? Domínguez AlonsoたちがCTスキャンを使って作成した始祖鳥の脳頭蓋と脳の三次元復元像。脳と内耳の解析から、始祖鳥には飛ぶための装備が整っていた可能性が高いという結論に至った。この復元像は長さ約20mmで、赤い部分は化石化する間に沈澱した二酸化マンガンの結晶。

め、X線で脳頭蓋を薄く「スライス」し(1枚の切片は印刷版ネイチャー誌の紙1枚の半分未満という薄さ)、次に頭蓋腔や内耳をデジタル画像で復元した。

脳や感覚器官に関する情報収集は古生物学研究の最優先事項の1つである。こうした知識から、骨格そのものからでは分からない絶滅した生物の行動を知る手がかりが得られるからだ。始祖鳥の場合、発見当初から「知られるうちで最古のこの鳥類は本当に飛べたのか」という疑問がもたれていた。これまで、その答え探しは空力学の面から行われ、当然のことながら翼や羽毛の構造に焦点が当てられてきた^{3,5}。しかし、たとえば飛行機が飛ぶのに関係するのは翼や方向舵やフラップだけではなく、操縦士や搭載コンピューターもかかっている。今回の研究⁴では、始祖鳥について今まで欠けていたこの種の頭脳情報が報告されている。

始祖鳥の脳は、原始的ではあるが現在の鳥類の脳によく似ている。体サイズが同じくらいで平均的な爬虫類の脳よりも大きい、同じくらいの体サイズの現生鳥類の脳と比べ

るとおしなべて小さい。脳のつくりも基本的には鳥類のもので、運動にかかわる領域が大きい。しかも、視覚中枢が大きくなっていることから、始祖鳥は視覚偏重型の動物だったと考えられる。特に重要なのが、繊細なつくりの内耳蝸牛管について得られた新たな知見である。というのも、最近の研究によって行動や生活様式と蝸牛管の構造が関係づけられたからである^{6,7}。始祖鳥の蝸牛管もやはり、現在の爬虫類より鳥類のものに似てお

り、これからみて俊敏な動きや頭部と目の間の協調性は相当高かったとみられる。

では、これは飛翔能力のある動物の脳や耳なのだろうか。翼竜ではまったく別個に飛翔能力が進化しており、ここからある程度の手がかりが得られる。翼竜は、2億3,000万～6,500万年前の空を飛び回っていた飛翔能力のある絶滅爬虫類群である。同僚たちと私が行ったCTスキャン研究⁶で、翼竜の脳や内耳蝸牛管の拡大や構造の様子が、始祖鳥で見られるものと酷似していることがわかってい。しかも、脳/体のサイズ比は両者ほぼ同じである。互いに独立に進化してもこうした類似性が見られることから、飛ぶためには神経の面で何らかの基本的必要条件があるのかもしれない。実際 Domínguez Alonso たち⁴の主張によると、神経学上の見地からみて、始祖鳥には飛ぶための「正しい資質」が本質的に備わっていたという。しかしその一方で、捕食型の(獣脚類)恐竜の一部(始祖鳥と他のすべての鳥類を含む分類群)は鳥類と似た脳の特徴をいくつかもっていたとも述べている。Domínguez Alonso たちの考えでは、始祖鳥は「現生鳥類のパターンにさらに近い段階」だという。この仮説はおそらく、この研究の最も興味をそそる成果だ。我々はいよいよ、知られるうちで最も原始的な鳥類の脳と内耳について信頼できるデータを手に入れたのであり、これで鳥類への神経上の移行を証明できる。

こうなれば研究者たちは先を争って、始祖鳥で特定された特徴を他の初期鳥類や鳥類様獣脚類の化石で探し出そうとするだろう。鳥類への移行の詳しい状況はどんなふうだったのだろうか。「鳥類」の神経の構成部分は足並みそろえて進化したのか、それとも、てんでばらばらに進化したのだろうか。まだ飛べなかった鳥類の先祖たちが、こうした神経構成部分の多くを発達させていたことが明らかになる可能性もある。もしそうだとすれば、翼竜が明らかにゼロから神経の飛翔制御系を作り上げた⁶のに対して、鳥類は遺伝的に受け継いだ高度の神経装置を進化の過程で飛翔のために流用し、それが結果的に飛翔の向上につれて磨き上げられたのかもしれない。一番の議論をよぶ種はおそらく、最も鳥類に似た白亜紀獣脚類(ペロキラプトルなど)の一部が実は始祖鳥様の初期鳥類の二次的に飛べなくなった子孫だった、とする異端の説⁸だが、「飛ぶための脳」や「飛ぶための耳」の特徴が把握できれば、こうした説を検証する手だてにも

なりうるのではないだろうか。

始祖鳥の論文は多々あるが、今回の最新の論文によって始祖鳥化石の象徴としての存在の大きさが保たれた。改めてよくわかったのは、始祖鳥で始まった議論は始祖鳥で終わるということだ。

■
著者の Lawrence M. Witmer はオハイオ大学整骨療法医学校の生物医科学科に所属している。
e-mail: witmerL@ohio.edu

1. Xu, X. *et al. Nature* **421**, 335–340 (2003).
2. Zhou, Z., Barrett, P. M. & Hilton, J. *Nature* **421**, 807–814 (2003).

3. Elzanowski, A. in *Mesozoic Birds* (eds Chiappe, L. M. & Witmer, L. M.) 129–159 (Univ. California Press, Berkeley, 2002).
4. Domínguez Alonso, P., Milner, A. C., Ketcham, R. A., Cookson, M. J. & Rowe, T. B. *Nature* **430**, 666–669 (2004).
5. Rayner, J. M. V. in *Biomechanics in Evolution* (eds Rayner, J. M. V. & Wootton, R. J.) 183–212 (Cambridge Univ. Press, 1991).
6. Witmer, L. M., Chatterjee, S., Franzosa, J. & Rowe, T. *Nature* **425**, 950–953 (2003).
7. Spoor, F. *et al. Nature* **417**, 163–166 (2002).
8. Paul, G. S. *Dinosaurs of the Air: The Evolution and Loss of Flight in Dinosaurs and Birds* (Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, 2002).

もっと深いところまで理解する

Thomas S. Duffy

地球内部の核とマントルの境界は、もっとも謎に満ちた領域である。

新たに発見された結晶相の研究で、この領域の解明がさらに進むだろう。

原文: *Deeper understanding* Nature Vol.430 (409-410)/22 July 2004; www.naturejpn.com/digest

地球のマントル最深部の厚さ 250km 程度の領域は、歴史的な理由から D^o 層として知られていて、体積は比較的小さい。しかし、多くの地球物理学的現象、なかでもマントル中でのプリュームの形成、核とマントルの相互作用、また、テクトニックな力によって地球内部に引き込まれ沈み込んでゆく地殻スラブは最終的にどうなるかといったことを理解する鍵を握っている可能性がある。この領域の研究は地震波のふるまいを解釈することで行われるが、極めて複雑であることが分かっている。しかしながら、この領域の鉱物の高温高压下での特性についての研究ではこのような複雑さのほとんどはうまく説明されなかった。問題の1つとして、D^o 層の極限条件、つまり 135 ギガパスカルにおよぶ圧力とおそらく 2,000K から 4,000K の範囲にある温度を実験室で実現することの困難さがある。しかし、結局は室内実験と理論とが一体となることで、この領域のことがよりはっきりと分かるようになった。

Nature 7/22 号 p.442 から始まる、飯高ら¹ および Oganov と小野² の論文で、最近発見された³ 高压下の結晶構造に関する物理特性の計算結果と下部マントル深部の地震観測とを結びつける知見が報告されている。地球のマントルの主成分はマグネシウム、鉄、カルシウム、アルミニウムを含む密度の高い珪酸塩鉱物である。深度 660km から深度約

2,900km のマントルの底まで広がる下部マントル(図 1)は主にペロブスカイトとして知られる結晶構造の(Mg,Fe)SiO₃ から成ることが実験によって明らかになっている。この物質の性質は下部マントルに対するほとんどの観測結果と矛盾しないが、マントル底部近辺における特性の急激な変化はペロブスカイトの挙動からは説明できない。

それゆえ、村上らによって D^o 領域と同等の条件下での MgSiO₃ の「ポスト・ペロブスカイト相」が実験で発見されたこと³ は、新しい相の物理特性に関する少なからぬ関心呼び起こした。このような条件下で直接実験を行うのは困難なため、飯高ら¹ および Oganov と小野² が行ったこの相についての第一原理による量子力学的な計算は、地球深部を研究する上でとりわけ有効である。ペロブスカイト構造が多くの化合物に広く見られるのと異なり、ポスト・ペロブスカイト相はかなり珍しいものようだ。この構造では、陽イオンのシリコンはそれぞれ陰イオンの酸素 6 個に囲まれたまま、下部マントルの特性である 8 面体配位を作る。しかし、ペロブスカイトでは角の部分で結合した 3 次元の網状組織を形成しているのに対して、ポスト・ペロブスカイト相ではシリコンの 8 面体が縁と角を共有してマグネシウム層とシリコン層が交互に重なったシートのような構造を作る(飯高らの論文、Nature 7/22 号 p.442 の図 1 を参照)。