

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ブリュームの形成、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)。

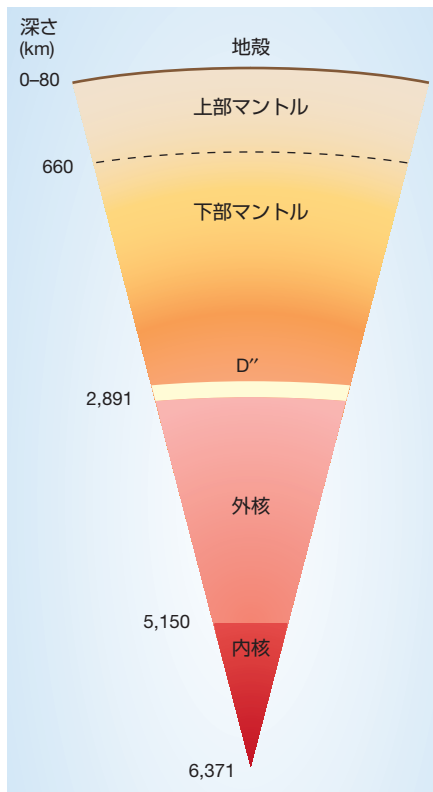


図1 地球内部の主要な領域。下部マントルの最新の解釈、D''層については図2に示す。

このことは室内実験で十分実証されているかもしれない³。しかし、理論計算によってポスト・ペロブスカイト相の他の特性のいくつかが今回明らかにされた。まず第一に、熱力学的な問題を考慮に入れて、飯高ら¹およびOganovと小野²は0Kで約100Gpa以上の圧力ではポスト・ペロブスカイト相は安定であると期待できることを示した。さらにOganovと小野²は118Gpa近辺で加熱した後の新しい相の実験観察結果を付け加えている。このような極限条件下での実験では、構造変化の報告は検証されないことがあまりにも多い。そこで、ポスト・ペロブスカイト相についての複数の実験観察結果²⁻⁴と安定性に関する理論的な予測とを併せて、新しい相の意味合いについては真剣に考えることが重要である。確かに、この2つの理論的な研究報告^{1,2}は他の研究^{5,6}の結果ともおおむね一致しているのだ。

実験結果と併せて、0Kでの理論計算の結果はこの転移が正の圧力-温度勾配をもつことを示している。マントルの温度では、相転移はマントル底部から約200~300km上(図2)で起こると予測され、その深さで^{7,8}おそらくは全球にわたって^{9,10}起こっている地震波速度の急激な変化あるいは不連続に対する証拠と一致している。相境界の正の勾配は、D''不

連続面が地震波の速い(おそらく温度の低い)領域では押し上げられ、地震波の遅い(温度の高い)領域では押し下げられているという地震波の証拠¹⁰とも矛盾しない。この新しい相はD''層の条件ではペロブスカイトよりも約1~2%密度が高いことも分かった。

弾性特性の計算から、ポスト・ペロブスカイト相は異方性で、層に平行な方向よりも垂直な方向の方が圧縮性が高いことが確認された。また、地震波の速度にかなり異方性があり、特に横波として知られる種類の波に対して大きいことが明らかになっている。この構造の性質を考えると、ポスト・ペロブスカイト結晶は格子選択配向を示すようになり、層に垂直な方向が鉛直方向を向く傾向にあるというのはもっともらしい。層状構造が不完全な場合、他の層の存在を考慮に入ると、マントル深部の観測⁷⁻¹⁰と矛盾しない2~3%の地震学的不連続はこの相転移に起因するようだ。この転移は地震波のもう1つの主要な種類の波である縦波よりも横波により大きな不連続をもたらすと予測される。

このような形の微細構造によって、垂直方向に偏向した横波(速度 v_{SV})よりも水平方向に偏向した横波(速度 v_{SH})が速く伝搬するようになる。D''層の地震学的異方性は複雑だが、この意味での異方性はある領域については詳

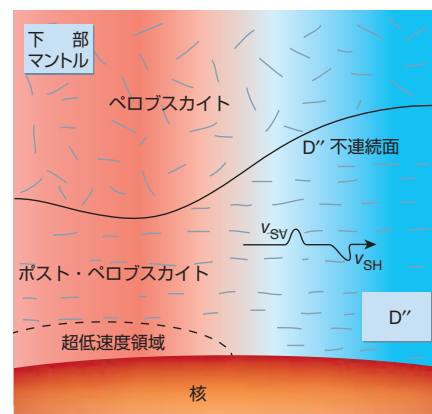


図2 マントル底部の新しいモデル。現在では、D''不連続面はマントル底部から約200~300km上で(Mg,Fe)SiO₃がペロブスカイト構造からポスト・ペロブスカイト構造へ転移するためにできると考えられている。相境界は局所的に温度の低い領域(青)で上昇し、局所的に温度の高い領域(赤)で下降する。ポスト・ペロブスカイト相の層状構造が地球の核に平行に配列する傾向があることは、垂直方向に偏向した横波(v_{SV})よりも水平方向に偏向した横波(v_{SH})が速く伝搬することの説明に役立てられる。超低速度領域は薄い(厚さ5~40kmの)領域で、核のすぐ上にあり、横波の速度は非常に遅くなっている。

しく記録されている¹¹。以前は、このようなふるまいと下部マントルを構成するペロブスカイトその他の鉱物の弾性特性や変形挙動とを一致させることは困難であった。その代わり、異方性は配列した含有物や異なる地震波速度を持つ鉱物の層状構造に起因すると提案されていた。ポスト・ペロブスカイト相の発見はより簡潔な説明を与えるかもしれない。

提案されているペロブスカイトとポスト・ペロブスカイト間の転移はD''領域についてのすべての問題を解くには十分ではない。しかし、この領域を研究する新しい足がかりとなり、地球物理観測、室内実験、コンピュータを用いた計算がさらに促進されることは確実である。鉱物物理の観点からは、微細構造の発達についての研究は、より化学的に複雑な系のふるまいについての制約の研究と同様に、明らかに必要なものである。また、弾性的な異方性は0Kで計算されているだけであり、場合によっては温度により異方性の大きさや方向すら大きく変わる可能性がある。理論的な研究^{1,2,5,6}は極めてよく一致している。しかし、ある程度の近似を含む類似した手法がすべてに用いられており、さらに進んだ考察も必要となるだろう。

とはいえ、地球マントル最深部の研究の新しい時代が始まった。D''不連続面とこの領域の地震学的異方性の徴候の双方に関する説明は、ついに手の届くところにまできたのかもしれない。

Thomas S. Duffy はプリンストン大学地球科学部に所属している。

e-mail: duffy@princeton.edu

1. Iitaka, T., Hirose, K., Kawamura, K. & Murakami, M. *Nature* **430**, 442–445 (2004).
2. Oganov, A.R. & Ono, S. *Nature* **430**, 445–448 (2004).
3. Murakami, M., Hirose, K., Kawamura, K., Sata, N. & Ohishi, Y. *Science* **304**, 855–858 (2004).
4. Shim, S.-H., Duffy, T. S., Jeanloz, R. & Shen, G. *Geophys. Res. Lett.* **31**, L10603 (2004).
5. Tsuchiya, T., Tsuchiya, J., Umemoto, K. & Wentzcovitch, R. M. *Earth Planet. Sci. Lett.* **224**, 241–248 (2004).
6. Tsuchiya, T., Tsuchiya, J., Umemoto, K. & Wentzcovitch, R. M. *Geophys. Res. Lett.* **31**, doi:10.1029/2004GL020278 (2004).
7. Lay, T. & Helmberger, D.V. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **75**, 799–837 (1983).
8. Wysession, M. E. et al. in *The Core–Mantle Boundary Region* (eds Gurnis, M. et al.) 273–297 (Am. Geophys. Un., Washington DC, 1998).
9. Nataf, H.-C. & Houdard, S. *Geophys. Res. Lett.* **20**, 2371–2374 (1993).
10. Sidorin, I., Gurnis, M. & Helmberger, D.V. *Science* **286**, 1326–1331 (1999).
11. Kendall, J.-M. & Silver, P. G. *Nature* **381**, 409–412 (1996).