

# Magical mantle tour

## 地球深部の 謎を解く

Nature Vol.440(1108-1110)/27 April 2006



C. DARKIN

日本人研究者が最近発見した結晶構造は、地球の奥深くで起こっているさまざまな現象を説明するとみられる。地球物理学者たちは、この結晶構造をさらによく理解しようと必死だ。David Cyranoski が取材した。

そこは、あらゆることがおかしくなる不思議な場所だ。地下約2700キロメートルの地球内部。固体マントルと液体である外核（地球の核のうちの外側部分）の境界のすぐ上にあるその層では、地震波が奇妙なふるまいをする。一部の地震波は一定速度で進み続けるのではなく、その領域へ入る際に加速し、いったん内部へ入ると今度は進行方向によって速度を変える。一部の小さな領域では、地震波の速度が30パーセントも遅くなることもある。

こうした地震波は、科学者たちが地球の深部を探るための主たる手段だ。地球内部で反射する地震波に関する研究からは、地球が地殻、マントル、外核、内核の層になっていることがわかった。そして「D」（ディーダブルプライム）層」とよばれるのが上述の問題の層である。だが、

この層で地震波がみせる奇妙なふるまいの原因はいったいどこにあるのだろうか。

最近まで、この疑問にどう答えればよいのか誰もわからなかった。リバプール大学（英国）の地震学者 Christine Thomas は「2、3年前は地球深部の地震学は停滞しているように思えた」と話す。そうしたなかで、東京工業大学大学院の廣瀬敬が率いる研究グループは2004年、マントル最深部の圧力と温度を実験室で再現したことを報告した（コラム「2つの発見物語」参照）。そして廣瀬たちは、マントル最深部に豊富にあるとみられる鉱物、ケイ酸マグネシウム（ $MgSiO_3$ ）が、これまで知られていなかった結晶構造をとることを発見した<sup>1</sup>。

この構造は  $MgSiO_3$  の「ポストペロフスカイト相」といい、ありふれたペ

ロフスカイト構造と同じ化学組成をもつが、原子の並び方が異なっている。「ポストペロフスカイトはより密で、3次元の結合構造をもつペロフスカイトと比べると、2次元のシートを重ねたような構造になっている」と廣瀬は説明する（右ページ図を参照）。こうした原子配列の変化は相転移の一種だが、これが地球の下部マントルでの地震波の異常なふるまいを説明づける可能性がある。

### さまざまな物質に見つかる

相転移は地質学ではありふれたことで、廣瀬が見いだした真相も聞く人によってはがっかりするかもしれない。ロンドン大学ユニバーシティカレッジの鉱物物理学者 John Brodholt は、「我々がここ何年も探してきたものが、相転移にすぎなかったとは」と話す。しかし、ポストペ

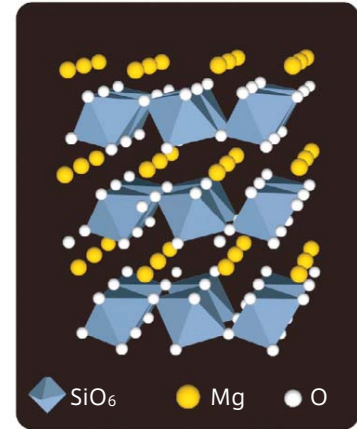
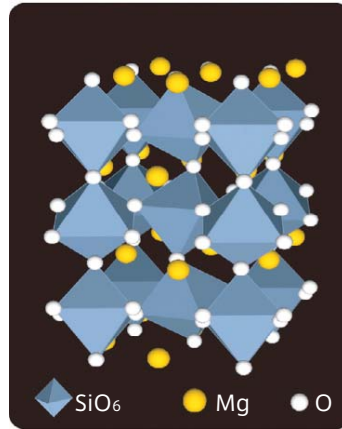
ロフスカイト相の発見は地震学や地球力学、鉱物物理学の分野を活気づけた。

廣瀬の論文が巻き起こした興奮の中で、研究者たちはポストペロフスカイト構造の特性や、この構造によって解明される可能性があるその他の地震学的謎、また、マントル内の熱の流れにおけるこの構造の意味について議論した。惑星科学の専門家たちは、ポストペロフスカイト構造の発見をふまえ、地球の自転速度の変動原因を再検討しているほか、地球以外の惑星の特徴についてもこの構造で説明できないかと考えている。スイス連邦工科大学チューリッヒ校の結晶学者 Artem Oganov は「理論家として私たちは、実験から得られる手がかりを待っていた。この構造の発見は大きな刺激となった」と話す。

廣瀬のグループによる最初の発表後、鉱物物理学者たちは実験と理論の両面からポストペロフスカイト構造の  $MgSiO_3$  の存在および構造を確かめた<sup>2,3,4</sup>。そして研究者たちは、ケイ素の場所にゲルマニウムがあるゲルマニウム酸塩など、ほかの鉱物についても調べた。すると、そこにもポストペロフスカイト構造が見つかった。プリンストン大学（米国ニュージャージー州）の地球物理学者 Thomas Duffy は「これまで誰もこの構造を見つけていなかったことが驚きだ」という。

ポストペロフスカイトによって、長年の謎の多くが明らかになるようだ。たとえば、Brodholt たちはシミュレーションを使い、S 波とよばれる地震波が、D" 領域中のある場所でなぜ突然加速するのかという疑問に取り組んだ。また、S 波の D" 領域中でのふるまいは、別種の地震波である粗密波（P 波）とも異なっている。もし、その領域がペロフスカイトではなくポストペロフスカイトを含むなら、両方の観測結果はポストペロフスカイトの特性によるものといえるだろう<sup>5</sup>。

同様にポストペロフスカイトは、D" 領域中を進む S 波が方向によって速度を変える理由も説明できる。これは地震波の「異方性」とよばれる現象だ。ポストペロフ



ペロフスカイト（左）とポストペロフスカイトの構造（右）。

スカイトの原子の並び方の向きにより、S 波はある決まった軸に沿って結晶中をより速く進む。D" 領域での地震波観測結果の異方性パターンは、これで説明される<sup>6,7</sup>。

### 深まる謎

「こうした原子レベルでの研究は、地球科学におけるさらに大きな疑問を解明する。たとえば、熱や岩が地球深部から地球表面へ向かってどのように流れるかといった問題だ」と廣瀬は話す。ペロフスカイトがポストペロフスカイトに変わるときに結晶格子構造がどう変化するかを理解すれば、下部マントル中の流れの速度と方向を知ることができる。

ポストペロフスカイトはさらに、マントルを対流させる巨大なエンジンを動かしている、もうひとつの動力源なのかもしれない。マントルの比較的低温の領域では、相転移は圧力が低い、つまり深さが浅いところで起こる。周囲の高温領域と比べると、新たにできるポストペロフスカイトは温度が低だけでなく、密度も高くなり、これがポストペロフスカイトの沈み込みのもう 1 つの理由となる。カリフォルニア大学サンタクルーズ校の地震学者 Thorne Lay は「相転移は、対流を後押ししている追加ポンプのようなものだ」と話す。

もし、ポストペロフスカイトが地球内部の力学において本当にそれほど重要なら、この新しく発見された構造は大きな成功といえるだろう。しかし今

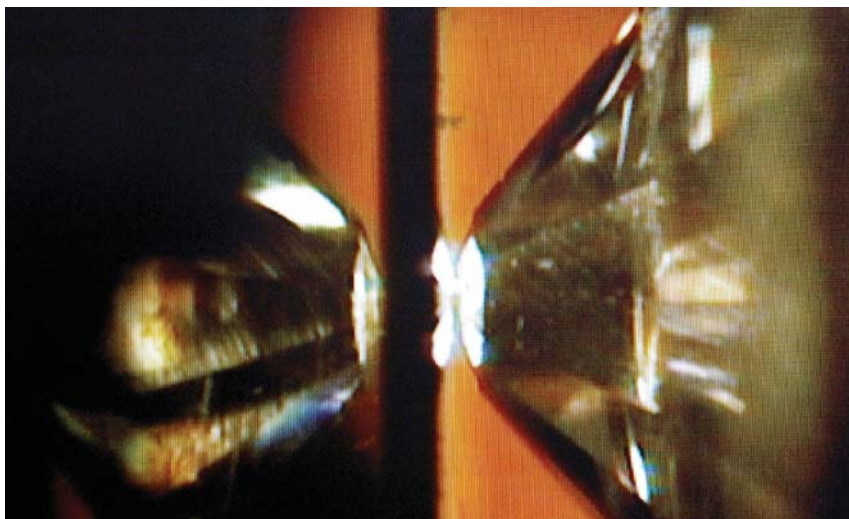
のところ、ポストペロフスカイトによって解明された謎よりも多くの疑問が新たに生まれているようだ。

たとえば、地震波の異方性にポストペロフスカイトが果たす役割に関する研究のすべてで、結晶構造がどう変形するかの予測が食い違っている。研究者たちは、正しい変形パターンと自身のモデルが合わなければならないことを理解しているが、そもそもどの変形パターンが正しいのかがまだわかっていないのだ。

相転移が起こる圧力と温度の関係も正確には解明されていない。相転移は特定範囲の圧力と温度で起こり、より高温では高圧力が必要だとわかっている。しかし、圧力のデータは実験に使われた装置によって 15 ギガパスカルもの違いがある。これは深さに換算して 350 キロメートルの違いに相当する。廣瀬は昨年 10 月、東京で開かれたポストペロフスカイトのワークショップで「不確かさの最大の要因は、装置による圧力の食い違いだ」と話した。

### 地球の自転速度にも影響？

スイス連邦工科大学チューリッヒ校の理論モデル作成者 Paul Tackley は「D" 領域では温度が大きく変化することを考えると、ポストペロフスカイトがどこに現れるかを知るのはむずかしい」と話す。彼が行ったシミュレーションによると、約 3200℃の比較的熱い領域にはポストペロフスカイト相はないだろうという<sup>8</sup>。この



プレッシャーのもとで：ダイヤモンドアンビルは地球深部の高圧を再現する。

温度は、マントルと同程度の深さのほかの領域よりも 1000°C ほど高い。そしてこの比較的熱い領域では、マントルブルームが生じると考えられている。マントルブルームは地球の深部から上昇する上昇流で、熱と岩の巨大な道筋となり、地球表面では火山のホットスポットとして現れていると多くの研究者が考えている。

地球の力学に関係する、ある重要な問題についても大きな疑問が残ってい

る。地球の核を構成する液体の鉄は、マントルとどの程度相互作用しているのかという問題だ。鉄原子は、 $MgSiO_3$  のマグネシウムの一部と置き換わることができる。シカゴ大学（米国イリノイ州）の Wendy Mao は、まさにどれだけの鉄をポストペロフスカイトが取り込むかを測定した。

その結果 Mao は、ポストペロフスカイトがこれまで知られていたどの下

部マントル材料よりもずっと多くの鉄を取り込むことを発見した<sup>9</sup>。「鉄はポストペロフスカイトにおいて支配的で、きわめて複雑な役割を果たしているのかもしれない」と彼女は話す。鉄吸収は、マントル底部の特定の小領域における地震波の劇的な減速に関する説明できるかもしれない。しかし、鉄が含まれる場合はペロフスカイトがポストペロフスカイトへと変わる圧力の範囲も広がり、相転移が起こる境界を正確に定めるのはさらにむずかしくなる。

こうした問題は、ポストペロフスカイトのふるまいに関する単純なモデルで複雑な領域を理解しようとしているために生じるのかもしれないと Lay は指摘する。彼は、「ポストペロフスカイトの性質に関する見積りものすべてが数値モデルに基づいていることが大きな問題だ」という。そして、さまざまな要素が複雑に関与する領域について、「数値モデルが本当に妥当であるかは明らかではない」と話す。

D" 層の詳細は明解になるというより、さらに複雑になってしまいそうだ。「当初はポストペロフスカイトがすべてを説明するかもしれないという興奮があった。

## 2つの発見物語

ポストペロフスカイト構造の  $MgSiO_3$  は、長く待ち望まれた発見だった。その発見はどのように行われたか。答えはだれに尋ねるかによって変わってくる。

廣瀬敬と小野重明は、かつては協力して研究していた。しかし、今は廊下での丁寧なあいさつを除いて言葉を交わすことはない。

2人はともに東京工業大学の1階離れた階で研究している。廣瀬は同大学の教授であり、小野は海洋研究開発機構の研究員で、別の科学者と協力している。廣瀬と小野は同じような研究に取り組んでいる。ダイヤモンド

アンビルとよばれる装置を使って2つのダイヤモンドの間で材料を締めつけ、レーザーで加熱する。2人とも、地球の内部を模した極端な高圧下で材料の性質がどのように変化するかを測定している。

廣瀬も小野も、鉱物  $MgSiO_3$  のポストペロフスカイト相の発見に重要な貢献をした。しかし、廣瀬が昨年10月、ポストペロフスカイトに関する会議を東京で組織したとき、小野は講演者として招待されなかった。

廣瀬は社交的で話好きの快活な性格だ。昨年10月には、米国・ワシントン DC のカーネ

ギー研究所でポスドク特別研究員だったときに覚えた自信に満ちた英語でワークショップを指揮した。対して小野は日本語での取材を望み、内気で生まじめ、控え目な性格だ。

しかし彼らの不信は、単なる個性の不一致から生まれたのではない。2人はそれぞれの「ポストペロフスカイト発見物語」をもっている。

2人とも、技術の進歩が道を開いたという点では同じ意見だ。1987年に発表された論文を基に、 $MgSiO_3$  のペロフスカイト相はマントルの底近くの圧力下でも安定だとほと



廣瀬敬教授：廣瀬は「小野はいつも内容を隠して研究を進めていた」と話す。

んどの研究者が信じたと廣瀬はいう<sup>11</sup>。だから、ポストペロフスカイトを探す価値はほとんどないように思えた。「実験を試みた者は多くなかった。

しかし、研究者たちは今、その性質を冷静に見つめ直している」とMaoは話す。

不確かなことは残っているが、研究者たちは新しい研究領域へと突き進んでいる。海洋研究開発機構（本部・神奈川県横須賀市）の小野重明は、 $MgSiO_3$ が地球のある謎を解く可能性について調べている。「地球の自転は10年の期間でみて数ミリ秒、加速・減速している」と小野は話す。核とマントルの電磁的な結合がこれを引き起こしているという仮説があるが、もしそうであれば、下部マントルの電気伝導率は高くなければならない。ペロフスカイトの伝導率は高くないので、下部マントルが（多くの科学者が考えていたように）主にペロフスカイトでできているならばこの仮説は成り立たない。

しかし小野は、ポストペロフスカイト構造の $Al_2O_3$ （ポストペロフスカイト構造の $MgSiO_3$ よりも性質がよくわかっている酸化アルミニウム）の電気伝導率が高いことを発見した。彼は、ポストペロフスカイト構造の $MgSiO_3$ もおそらく $Al_2O_3$ と同じ特性の多くを備え、地球の自転速度の変動を説明するのに十分なほどに高い電気伝導率をもつと主張する。

「これはポストペロフスカイトが新たに説明する、地球の謎の1つだ」と小野はいう。

### ほかの惑星にも

研究者の中には、ポストペロフスカイト構造の $MgSiO_3$ がほかの惑星でどのような役割を果たしているかを考えている者もいる。ミネソタ大学ミネアポリスキャンパスのRenata Wentzcovitchたちは、ガス巨星や、ほかの太陽系にある岩でできた惑星の内部におけるポストペロフスカイトのふるまいをシミュレーションした。そしてそうした高圧・高温の場所では、 $MgSiO_3$ はほとんど金属のようにふるまい始めることがわかった<sup>10</sup>。

地球ではポストペロフスカイト層の下の一部領域にペロフスカイトがあるかもしれないという可能性があり、多くの科学者たちが期待をふくらませている。これは、S波が最初は加速、次に減速と2段階で速度を変えることを示す地震波データの説明となるだろう。さらには、深さによる温度変化についても明らかになるかもしれない。「これは下部マントルと核の一種の温度計となるだろう」とThomasは話す。

廣瀬自身は今回の有用な発見について、もしかしたら研究者たちを困惑させているかもしれないとはいえ、よかったと思っている。ポストペロフスカイトはD"層の大部分については説明できないかもしれないが、その存在自体が重要である。「ポストペロフスカイトの割合はすごく大きくはないかもしれない。しかしそれは、核とマントルの間の温度的な境界であり、化学的な境界でもある場所にある。地球に関するきわめて重要な問題を理解するのにポストペロフスカイト構造はきつと役立つはずだ」と廣瀬は話している。 ■

David Cyranoski は、*Nature* のアジア・パシフィック担当記者。

1. Murakami, M. *et al. Science* **304**, 855-858 (2004).
2. Oganov, A. R. & Ono, S. *Nature* **430**, 445-448 (2004).
3. Tsuchiya, T. *et al. Earth Planet. Sci. Lett.* **224**, 241-248 (2004).
4. Shim, S.-H. *et al. Geophys. Res. Lett.* **31**, L10603 (2004).
5. Wookey, J. *et al. Nature* **438**, 1004-1007 (2005).
6. Oganov, A. R. *et al. Nature* **438**, 1142-1144 (2005).
7. Merkel, S. *et al. Science* **311**, 644-646 (2006).
8. Hernlund, J. W. *et al. Nature* **434**, 882-886 (2005).
9. Mao, W. L. *et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA* **101**, 15867-15869 (2004).
10. Umemoto, K. *et al. Science* **311**, 983-986 (2006).
11. Knittle, E. *et al. Science* **235**, 668 (1987).
12. Ono, S. *et al. J. Phys. Chem. Solids* **65**, 1527-1530 (2004).

実験もきわめてむずかしいものだった」と廣瀬は話す。

しかし、廣瀬は2002年までに、5年以上も前から心に描いていた実験を行うことに成功した。ペロフスカイト構造の $MgSiO_3$ 試料を核-マントル境界に近い圧力と温度におく実験である。彼は、大型放射光施設 SPring-8（兵庫県佐用町）で試料を分析した。そして、データの中に異常な回折パターンを見つけた。

データの分析を手伝ってくれる化学者を見つけるのに、何か月もかかったという。「化学が専門の教授たちは、データが間違っているか、あるいは私が間違っているに違いないといった」と廣瀬は振り返る。ようやく、東京工業大学の同僚で化学

者である村上元彦が、新年の休暇にデータを分析する時間をとってくれた。そして村上は、試料の中にポストペロフスカイト構造を発見した。

しかし小野は、ポストペロフスカイト発見への重要な段階がその6か月以上前にあったと主張する。彼は鉱物の赤鉄鉱（ヘマタイト）に、廣瀬が $MgSiO_3$ に見つけたのと同じ構造ができる、高圧での相転移があることを発見し、それをポストペロフスカイトだと考えた<sup>12</sup>。「私の目標は常に $MgSiO_3$ だった」と彼は話す。

SPring-8 を使っている研究者たちは、共同使用のコンピュータと公式のビームラインノートにデータを掲示するこ



小野重明研究員：小野は、廣瀬が自分をフェアに扱わなかったと感じている。

とが求められている。だから、廣瀬は自分の赤鉄鉱の研究を追いかけることができたのだと小野はいう。「これは完全に間違っていたことではないがフェアではな。だから私は彼に協力するの

をやめた」と小野は話す。廣瀬は小野について、「いつも内容を隠して研究を進める」という。2人の同僚は彼らの不和についてコメントするのを断っている。

2人の不和は、多くの研究者がかかわり、長く待ち望まれていた発見がなされるような場合にはつきものの出来事だったのかもしれない。理論家たちは1999年までに、地球内部のD"領域での異常なふるまいを説明する特性をもつ相転移をすでに明確に予測していた。ロンドン大学ユニバーシティカレッジのJohn Brodholtは「それはきわめて正確な予測だった。つまり、その予測にとって必要なのは実験的な証拠だけだった」と話している。 D.C.