

マントル遷移層が乾燥していたことを発見！

芳野 極

岡山大学地球物質科学研究センターの芳野極准教授らは、地球電磁気学的に観測された値と、地球内部の高温高圧状態を再現した実験値の比較から、地球のマントル遷移層にはほぼ水分がないという結果を導き出した。地球内部に水がどのくらい存在するかは、地球の進化やマントル対流などにかかわる重要な問題である。詳細は *Nature* 1月17日号で発表された¹。芳野准教授に研究の経緯や意義、今後の展望について聞いた。

「マントル遷移層」は水を含むポテンシャルがある

Nature Digest — なぜ地球内部の水を調べようと思われたのですか？

芳野 — ここ10年くらいは、マントルと水に関する研究が数多く報告されていました。水があったら、どのくらい地震波速度が下がるとか、岩石の融点などの下がるとか、マントルを構成する鉱物にどのくらい水が入りうるかなど、さまざまな角度の研究が行われています。しかし、水の存在自体はきちんと検証されていませんでした。この研究も、これまでの説のようにマントル中に水がたくさん含まれているのなら、それはどのくらいなのかを定量してみようという動機から始めたのです。蓋を開けてみれば、反対にマントルはとても乾燥していました。

ND — 岩石であるマントルと水には、どのような関係があるのでしょうか？

芳野 — 90年代の初め頃からマントルの鉱物にどのくらい水が入りうるのかという研究が始まり、90年代の半ばには「マントル遷移層」部分を構成する鉱物の水を含むポテンシャルが、ほかの地球内部の部分に比べてとても高いということがわかってきたのです。地球内部に水があるとすれば、マントル遷移層だろう、そう考えられてきました。地球内部の構造を分類すると、外側から地殻、上部マントル、下部マントル、外核、内核に分けられます(図1)。それぞれの部分で地震波の伝わり方や速さが異なるのです。その中でマントルは、地表から30kmくらいから2900kmまでの岩石でできている

部分を指します。それより深いところは金属から成るコア(核)とよばれる部分です。組成がほぼ同じであると考えられているマントルでも、地震波の伝わり方が大きく変わる場所が3か所知られています。地表から410km、520km、660kmです。この地震波速度がジャンプするかのように速くなる、410km~660kmの間をマントル遷移層とよんでいます。

ND — そうした地震波速度の変化は、なぜ起こるのでしょうか？

芳野 — マントルは岩石から成り、岩石は鉱物からなります。マントルは主にかんらん石という鉱物(8月の誕生石ペリドット)からできていると考えられています。地震波速度が急激に変化するところでは、鉱物の結晶構造が変わるのです。地球深部に進むほど、圧力と温度は高くなります。地表から410kmですと、かかる圧力は約14GPa、温度は約1400℃。ここでかんらん石の結晶構造が不安定になり、ワズレアイトという鉱物になります。520kmでは約18GPaで約1500℃、この状態で今度はワズレアイトがリングウッダイトに変化します。ちょうど石墨が同素体のダイヤモンドに変化するのと同じようなものです。さらに660kmでは、リングウッダイトが分解して2層の別の鉱物に変化します。ここが上部マントルと下部マントルの分かれ目となっています。

ND — これらの2つの鉱物に水が入りやすいということですか？

芳野 — 水といっても、地球深部の水はいわゆる水分子ではありません。基本的にマントルを構成する鉱物をいちばん単純な化学組成式で書くと水は入りません。ワズレアイトとリン

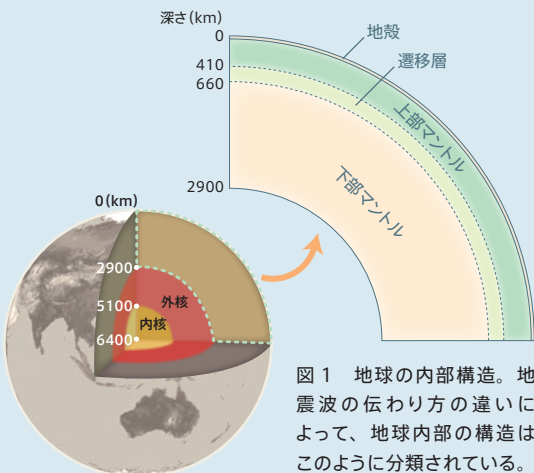


図1 地球の内部構造。地震波の伝わり方の違いによって、地球内部の構造はこのように分類されている。

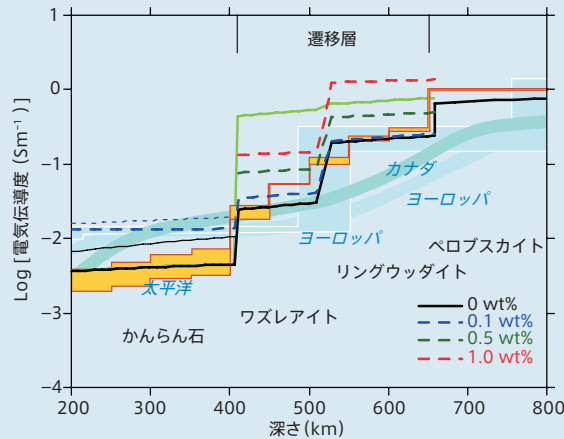


図2 マントル遷移層の電気伝導度
オレンジ色の帯は太平洋で実際に得られた、広域のマントル遷移層の電気伝導度を、水色の帯はヨーロッパやカナダなどで得られた局所的な値を示している。実線と点線は、実験から得られた電気伝導度。水が0% (黒い線) のときに、広域の観測値とよく一致していることがわかる。

T. Yoshino et al., *Nature*, 451, 326-329 (2008)

グウッドライトは、マグネシウムと鉄、シリコン、酸素からできているのですが、水素はマグネシウムやシリコンを置き換えて結晶構造中に入ることができます。鉱物結晶中の水素を地球物理学では鉱物中の「水」とよんでいます。ワズレアイトとリングウッドライトは、他の地球深部の物質に比べて水素の入るポテンシャルが高いということです。

磁気嵐を利用した観測値

ND — 今回の発見にも地震波速度が使われたのでしょうか？

芳野 — 地震波速度は水が入ると遅くなるという傾向はありますが、水のない鉱物とある鉱物を測っても2～3%という違いしかみられません。地震波速度の観測で水の量を決めることはかなりむずかしいわけです。そこで私たちが注目したのが電気伝導度です。電気伝導度は、水の存在にとっても敏感で桁で変化します。さらに、かなり信用度の高いデータが手に入ります。日本とアメリカ間の1万kmに及ぶ海底ケーブルを利用したものです。太陽からの磁気嵐が地球にやってくる時に、この海底ケーブルを側線として、地球の電気伝導度を測ります。この非常に広域なマントル遷移層の電気伝導度と、後述の高圧実験で求めた値を比較することで水の量を定めることができます。ほかの場所でも地球内部の電気伝導度を調べたデータはありますがいずれも局所的なものであるため、我々はこの太平洋の海底ケーブルを用いたデータを最も信用しています。

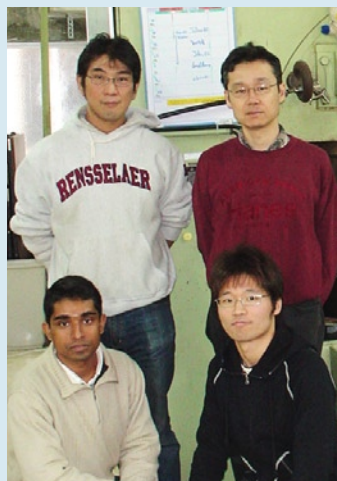
ND — これまでに電気伝導度を利用したマントル遷移層の研究はなかったのでしょうか？

芳野 — あります²。ただこれまでの研究では、マントル鉱物に2種類現れる電気伝導度を区別して測っていませんでした。水の量を決定するためには、小さなポーラロン伝導とプロトン伝導という2種類の電気伝導度メカニズムを区別する必要があります。地球内部では深さによって温度が変わりますが、この温度変化によって、マントル遷移層では2種類の電気伝導度のどちらが卓越するかが決まってくるのです。温度の低い方ではプロトン伝導が卓越します。

ND — その2つの電気伝導度とはどういうものですか？

芳野 — ワズレアイトとリングウッドライトの中には、必ず鉄が含まれます。この鉄には価数が2価のものとして3価のものが3価の場合、結晶中の電荷の中性を保つために、正孔（ホール）という電子の不足でできた孔が必要となります。正孔は電荷の中性を保つためにあたかも電荷をもっている状態となり、高温になるとこの正孔が動き始めるのです。動き回ることによって電気が流れます。これがポーラロン伝導です。プロトン伝導は、鉱物の結晶格子中にある水素によるものです。結晶中で水素はイオン化してプロトン（陽子）になります。水素原子は小さいために、結晶格子中を移動します。水が多いというのは、つまり水素が多いということですから、プロトンが増えてより多くの電気が流れるようになります。

ND — 高圧実験で求めた2種の電気伝導度と太平洋での観測値を照らし合わせたら、水のない場合と一致した……



今回の論文著者の芳野極准教授（左上）、桂智男教授（右上）、ギート・マンティララ博士課程学生（左下）、松崎琢也技術研究員（右下）。

芳野 極（よしの・たかし）／岡山大学地球物質科学研究センター准教授。理学博士。1970年、東京都生まれ。1993年、静岡大学理学部地球科学科卒業。1998年、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。1999年、東京大学地震研究所研究員、2001年、岡山大学地球物質科学研究センターCOE研究員などを経て、2008年2月より現職。

博士課程を修了するまでは、ヒマラヤ周辺で、隆起して露出した地殻の深い部分のフィールド調査を行ってきた。東京大学地震研究所に入ってから実験に目覚め、地球深部の再現を行っている。地球という複雑なシステムを、単純化した実験で再現することが可能かを判断するときに、学生時代のフィールド観察で養った感覚がとて役に立っている。地球深部を再現する高圧実験機を用いて、これまで*Nature*に3本の論文を発表している。

芳野 — はい。私たちはワズレアイトとリングウッドライトで、水の量が違う試料をたくさん作り、それらの電気伝導度を測って水の量の関数として電気伝導度を求めました。この値と先ほどお話しした太平洋の広域で得られた電気伝導度の値を比べると、水の量が0%の値と怖いくらい一致したのです（図2）。もし水が1%でも入っていれば、まったく観測値と合わないことがわかりました。こうした結果から一般的なマントルはかなり乾いているのではないかということがわかりました。ということは、問題となるプレート境界部で海洋プレートとともに沈み込んだ水のほとんどは、深さ200km程度より浅いところで脱水して、火山活動などを通じて地表に戻っている可能性が高いものと思われます。

地球のより“極地”を目指して

ND — 地球科学に興味をもたれたきっかけはなんですか？

芳野 — 父が地球高層物理の研究者で、南極越冬隊にも参加していました。私の名前の「極」という漢字は、南極から取ったものようです。また、父は研究で海外に赴き帰宅すると、よく家族を集めてスライドショーを始めました。こうした家庭環境で洗脳されたのかもしれませんが（笑）。

ND — 今後の課題は？

芳野 — より高圧の下部マントルで安定な鉱物、例えばアルミナを含むケイ酸塩ペロブスカイトは水を含むことが知られており、その電気伝導度への水の影響を調査することが必要かもしれません。下部マントルは地球の体積の半分以上を占めているので重要です。この圧力領域での電気伝導度測定はまだむずかしい課題です。ある意味、極地をめざすようなものですね。

ND — ありがとうございます。 ■

聞き手は坂元志歩（サイエンスライター）。

1. T. Yoshino et al., *Nature*, **451**, 326-329 (2008)
2. X. Huang et al., *Nature*, **434**, 746-749 (2005)