

地球深部の水循環を追う



研究ノート

土 屋 旬*

Tracing Water Through Earth's Deep Interior:
From Hydrous Minerals to the Origin of the Oceans

Key Words: Deep Earth water, Hydrous minerals, Origin of the oceans

はじめに

地球は太陽系で唯一の液体の水を表層に保持する惑星で、「水の惑星」と呼ばれる。地球表面の約7割は海で覆われており、水は生命活動や気候システムを支える不可欠な存在である。しかし、私たちが目にする海や河川、大気中の水は、地球全体に存在する水の一部に過ぎない可能性がある。

近年の研究によって、地球内部にも大量の水が存在することが明らかになってきた。ここでいう水とは、地下に巨大な海が存在するという意味ではない。鉱物の結晶構造の中に、水素や水酸基(OH)として取り込まれた「見えない水」である。地球内部に蓄えられている水の総量は、現在の海洋に存在する水の数倍に達する可能性も指摘されている。

私が地球深部の水に興味を持ったのは大学院生の頃である。当時から、地球内部にどれだけの水が存在するのかという問題は大きな謎であった。地球深部は直接観察することができない。しかし、地震波観測、高温高压実験、理論計算などを組み合わせることで、その姿を少しずつ明らかにすることができる。特に私が興味を抱いたのは、「水はどこまで地球深部へ運ばれるのか」という問題であった。

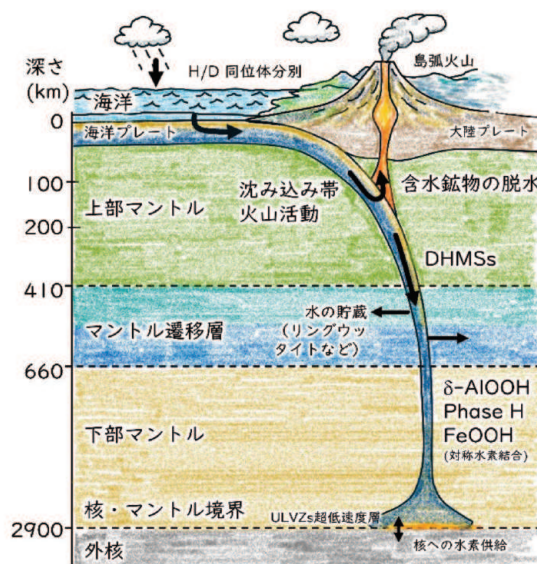
地球深部へ運ばれる水

地球表面の水は、プレートテクトニクスによって地球内部へ運ばれている。海洋プレートが海溝から沈み込む際、その中に含まれる蛇紋石や緑泥石など

の含水鉱物と一緒に地球内部へと引きずり込まれる。

これらの含水鉱物は層状の結晶構造を持ち、その内部に水素を含んでいる。しかし一般には、深さ100~200km程度に達すると高温高压条件によって分解し、水を放出すると考えられている。放出された水は周囲の岩石の融点を下げ、日本のような島弧火山活動やマグマ生成を引き起こす重要な役割を果たしている。

かつては、水はこの程度の深さまでしか運ばれないと考えられていた。しかし1960年代以降の高压実験によって、より高压下でも安定な含水鉱物が存在することが明らかになった。これらは高密度含水マグネシウム珪酸塩(Dense Hydrous Magnesium Silicates: DHMSs)と呼ばれ、地球深部へ水を輸送する「バトンランナー」として注目されている(図1)。



プレートの沈み込みによって地表の水が地球深部へ運ばれ、火山活動によってふたたび地表に戻る。一方で、高温高压条件でも分解しなかった含水鉱物はより深部へ運ばれる。

図1 地球内部の水循環



* Jun TSUCHIYA

1975年9月生まれ
大阪大学大学院 理学研究科 宇宙地球科学
専攻博士後期課程 (2003年)
現在、大阪大学大学院 理学研究科 宇宙地
球科学専攻 教授 博士 (理学)
TEL: 06-6850-5800
E-mail: junt@ess.sci.osaka-u.ac.jp

水素結合の不思議

DHMSsが地球深部に水を運ぶということが認識されていた2000年代初頭でも、下部マントルにはほとんど水が存在できないという考え方が一般的であった。下部マントルは深さ660 kmより深い領域であり、圧力は数十万気圧から100万気圧を超える。このような極限環境では、DHMSsは安定に存在できないと考えられていたのである。

当時は水素の位置を高圧実験だけで決定することが難しく、理論計算が重要な役割を果たし始めていた。ところが量子力学に基づく第一原理計算を用いて調べてみると、事情はそれほど単純ではないことが分かってきた。

含水鉱物の中では、水素原子は酸素原子同士を結ぶ「水素結合」によって保持されている。通常、水素結合は比較的弱い結合である。しかし圧力が上昇すると酸素原子同士の距離が縮まり、水素結合の性質そのものが変化する。さらに高圧になると、水素は二つの酸素原子の中間に位置する「対称水素結合」と呼ばれる特殊な状態へ移行する。

2002年、私たちは含水鉱物 δ -AlOOH において、このような圧力誘起水素結合対称化が起こることを理論的に示した。これは単なる構造変化ではなく、超高圧下において含水鉱物が予想以上に安定になる可能性を示唆する重要な発見であった[1](図2)。

下部マントルにも水は存在するのか

近年、高圧実験と理論研究の進展によって、含水D相、含水H相、 δ -AlOOH、FeOOH高圧相など、下部マントル条件でも安定な含水鉱物が次々と発見された。

特に2014年には、筆者の理論計算による予測と、西真之博士らの高圧実験によって含水H相が発見された[2]。この鉱物は下部マントル圧力条件下で安定であり、水を深部へ輸送する重要な担い手である可能性が示された。さらにFeOOH高圧相は、核とマントルの境界付近にまで到達できる可能性があることも分かってきた。

このような研究成果は、地球内部の水循環が従来考えられていたよりもはるかに大規模であることを示している。近年のシミュレーション研究では、地球内部に現在の海洋量の数倍から十倍以上の水が存在する可能性も指摘されている[4]。

ダイヤモンド包有物による証拠

2014年には、ブラジル産のダイヤモンド中からリングウッドイトと呼ばれる鉱物が発見された[3]。この鉱物は地表では熱力学的に安定ではなく、深さ約410~660kmのマントル遷移層の下部でのみ存在する高圧相である。さらに、このリングウッドイトには約1重量%の水が含まれていることが確認された。これは、マントル遷移層が巨大な水の貯蔵庫となっている可能性を示す重要な発見であった。

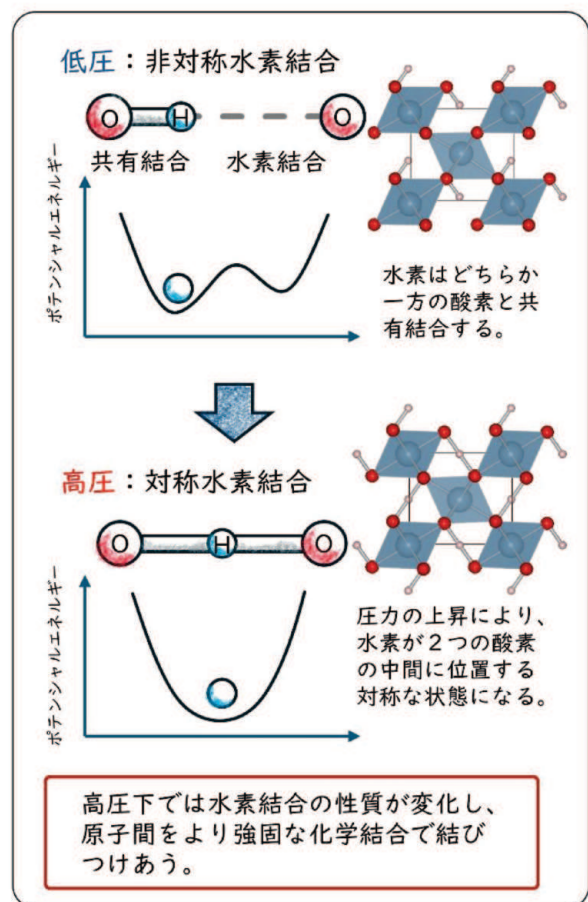


図2 δ -AlOOHと圧力誘起水素結合対称化

さらに近年では、下部マントル起源と考えられるダイヤモンド中から、高圧流体や含水鉱物の痕跡も報告されている。これらの発見は、水がマントル遷移層だけでなく、さらに深い下部マントルにも到達していることを示唆している。

もちろん、ダイヤモンド包有物の観察だけで地球全体の水の分布を決定することはできない。しかし、理論計算や高圧実験によって予測されてきた深部含

水鉱物の存在を裏付ける重要な証拠として、大きな意味を持っている。

惑星科学への展開

地球内部に水が存在することが明らかになるにつれ、新たな疑問も生まれてきた。マントル深部の水は地球だけに特有の現象なのだろうか。それとも他の惑星内部にも同様の水循環が存在するのだろうか。地球深部の水循環を理解しようとする研究は、近年、地球という枠を超えて惑星科学へと広がりつつある。

太陽系には、水に富んだ天体が数多く存在する。例えば木星や土星の氷衛星には大量の水や氷が存在し、地下海が広がっていると考えられている。また近年の天体観測によって、太陽系外にも地球より大きな「スーパーアース」と呼ばれる岩石惑星が多数発見されている。その中には、地球よりはるかに多くの水を含む惑星も存在する可能性がある。

このような惑星の内部では、地球よりもさらに高い圧力が発生する。地球内部で発見された含水鉱物や超高压下での水素結合の振る舞いは、そのような惑星内部を理解する上でも重要な手がかりとなる。実際、地球深部の含水鉱物の研究から発展して、超高压下における水や氷の状態、惑星内部での水の循環、さらには惑星形成初期における水の起源に関する研究も進められている。

地球の海の起源を追う

地球深部の水循環を研究する中で、私が近年特に関心を持っているのは、地球の水そのものの起源である。

地球が誕生した約46億年前、現在の海洋を形成した水はどこからやって来たのだろうか。この問題は地球科学における最も根源的な問いの一つである。これまで、小惑星や彗星が地球へ水を供給したという様々な仮説が提案されてきたが、決定的な答えはまだ得られていない(図3)。

この問題を考える上で重要な手がかりとなるのが、水素の同位体比である。水素には通常の水素(^1H)と重水素(^2H , D)が存在し、水や鉱物の形成過程において両者はわずかに異なる振る舞いを示す。そのため、水素同位体比は水の起源や移動履歴を記録する「指紋」として利用することができる。

現在、私たちは第一原理計算を用いて、超高压下

における含水鉱物と水の水素同位体分別を理論的に解明する研究を進めている。地球深部における水素同位体分別の仕組みを理解することができれば、地球内部を循環してきた水の履歴を読み解くことが可能になるかもしれない。さらに将来的には、地球の海をもたらした天体が小惑星だったのか、あるいは別の起源を持つのかを判断するための新しい手がかりを与えることが期待される。

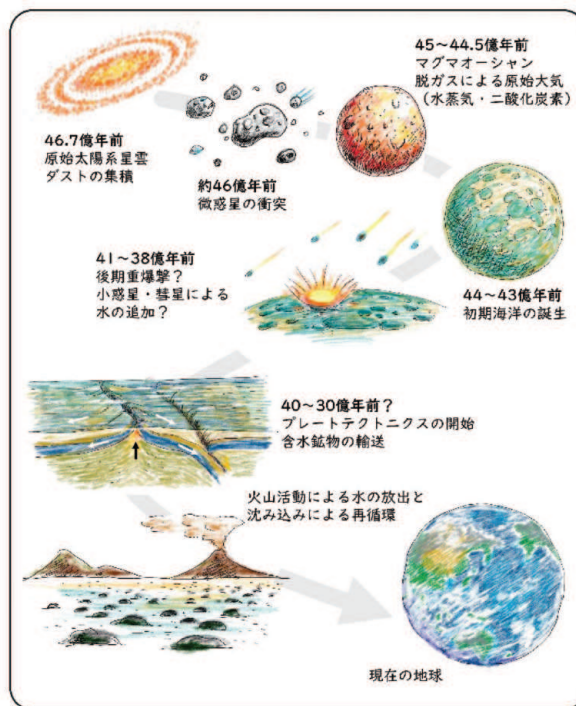


図3 地球の海の起源を追う

おわりに

現在では、水は地球内部を循環する重要な構成要素であり、地球の形成や進化を考える上で欠かせない存在として認識されるようになってきている。そしてその研究対象は、地球から太陽系、さらには太陽系外惑星へと広がりつつある。

私たちが日常目にする海は、地球に存在する水のほんの一部に過ぎないのかもしれない。地球深部を巡る見えない水の流れを解き明かすことは、地球という惑星の成り立ちを理解するだけでなく、その水がどこからやって来たのかという根源的な問いへとつながっている。

約46億年前に地球へもたらされた水は、地球内部と地表の間を循環しながら現在の海を形作ってきた。その壮大な歴史を読み解くことができれば、私

たちは「地球はなぜ水の惑星になったのか」という問いに近づくことができるだろう。

参考文献

- 1) Tsuchiya, J., Tsuchiya, T., Tsuneyuki, S. and Yamanaka, T. (2002) First principles calculation of a high-pressure hydrous phase, δ -AlOOH, Geophysical Research Letters, 29, 1909.
- 2) Nishi, M., Irifune, T., Tsuchiya, J., Tange, Y., Nishihara, Y., Fujino, K. and Higo, Y. (2014) Stability of hydrous silicate at high pressures and water transport to the deep lower mantle, Nature Geoscience, 7, 224–227.
- 3) Pearson, D. G., Brenker, F. E., Nestola, F., et al. (2014) Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond, Nature, 507, 221–224.
- 4) Tsuchiya, J. and Thompson, E. C. (2022) The role of hydrogen bonds in hydrous minerals stable at lower mantle pressure conditions, Progress in Earth and Planetary Science, 9, 63.
- 5) Tsuchiya, J. (2024) Dense hydrous minerals under pressure, Nature Geoscience, 17, 374.

