

地球中心核の水素

田川 翔
Tagawa Shoh

1. はじめに

地球と生命の誕生を考える上で、海の起源は避けては通れない。地球の表層環境は多様だ。海と陸の双方が存在するからこそ、地球の生命は現在のように進化できた。もし、海の量が数倍になってしまうと、多くの陸地は沈んでしまい、我々人類のような生命は、この星に生まれなかつただろう。

では、海の量はなぜ決まったのか。海は広大に見えるが、実は地球全体の質量のたった0.023%に過ぎない。地表の水は、いわばスパイスのように、惑星のテイストを決定付けたわずかな存在である。一方で、近年の惑星形成理論は、現在の海洋の何倍もの水が地球にもたらされた可能性を繰り返し指摘してきた。その量は地球の海の数十倍から百倍に及ぶ。地球の最初期に降ってきた水の量が偶然少なかったのか、それとも大量の水が降り注いだものの地球の海の量を「調整」したメカニズムが存在したのか、未だ議論が続いている。

本稿では、地球の海の起源を巡る仮説の1つである、地球中心核物質と水の化学反応に迫る。これは、地球の最初期、まだこの惑星の表面がドロドロに融けたマグマに覆われていた時代に、地球の核が形成される過程で起きた化学反応である。まず、地球の内部構造とコア形成モデルについて説明したあと、地球内部を再現する超高压・高温実験の内容について簡単に記す。その上で、筆者らの実験によって明らかになった、初期地球内部での水の振る舞いについてまとめる。なお、本実験の詳細は、2021年5月に*Nature Communications*誌上にて、公開されている¹⁾。

2. 地球内部構造の今・昔と「コア形成」

普段、地表にいる我々は、宇宙を見上げることはあっても、足元の世界に目を向けることは少ない。意外に思われるかもしれないが、地球の深くに行くことは、宇宙に行くよりも難しい。人類が地下を掘って到達した最大深度は、コラ半島（ロシア）での12 kmである。それより深い領域は、間接的に理解するしかない。その方法の1つが、「地震学」と「超高压・高温実験」の組み合わせである。地震波観測から各深度での密度や地震波の速度、そして層構造が分かる。そこで、地球を構成していると考えられる物質の候補を実際にその深さの条件まで加圧・昇温してみる。試料が、地震波観測で得られた物性や、層境界での変化を再現すれば、その物質が地球深部の化学組成だと分かるのである。こうして理解された現在の地球の断面が図1である。地球は、およそ

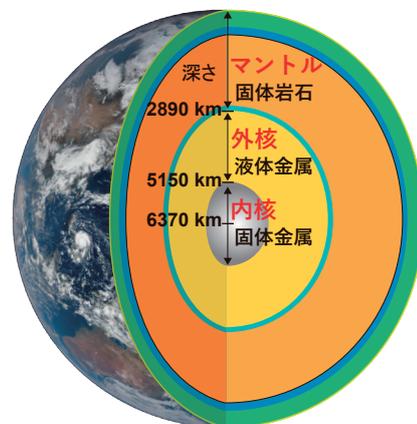


図1 現在の地球深部の構造

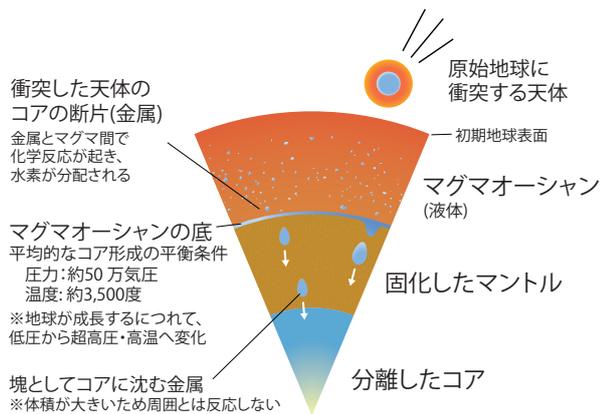


図2 初期の地球深部の構造とコア形成

2,900 km 以深に金属の核があり（中心から固体の内核、その外に液体の外核がある）、それより浅いところは固体の岩石である。

それでは、地球の内部構造は、初期地球においてどのように形成されたのだろうか。地球中心の金属核は、融けた岩石が厚く地表を覆う「マグマオーシャン」から金属成分が分離したことで形成されたと考えられている。原始地球に衝突する天体の中心核や隕石の金属成分がマグマオーシャンを通過する過程で化学反応を起こし、核へと様々な物質が分配される。最終的に、マグマオーシャンの底の温度・圧力で、化学平衡が達成される（図2）。

地球核の99%ほどが形成されるまでの核の分離プロセスを「コア形成」と呼ぶ。コア形成は地球の起源物質を決める作業仮説でもある。初期地球は、天体の衝突により徐々に大きくなっていくため、平衡の温度・圧力は次第に上昇する。現在、多数の元素の高温・高压下における金属・シリケートメルト（マグマ）間での分配係数の決定が進んでいる。

各元素は、次の3つのいずれかである。

- ①地球内部の全存在量が隕石から分かる元素：マントル中の存在量から、核の中の存在量が予想できる。その結果、核とマントルの元素濃度比があらかじめ分かる。この濃度比と高温高压実験で得られる分配係数が一致する温度・圧力・化学組成が、地球の核が形成された条件であり、およそ約50万気圧、3,500 K程度と推定される。
- ②地球内部の存在量が分からない元素：水、炭素等の揮発性元素は、地球全体の存在量が予想できな

い。これらの元素は、①で予想された温度・圧力・化学組成で決めた金属・シリケートメルト間の分配係数とマントル中の実測濃度によって、核の元素濃度を制約できる。

- ③強親鉄元素：コア形成でほとんど核に分配され、後に降着した分だけがマントルに残っているもの。別手法での見積もりを要する。

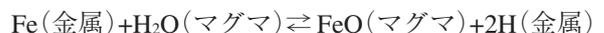
①に分類される元素のうち、Ni, Co, V, Cr等に着目することで、地球核の形成条件の温度・圧力とその変化^{2,4)}が提唱されている。つまり、そうした条件において、水素の金属・シリケート間の化学反応と分配係数が分かれば、核の水素量を制約でき、地球全体の水の量を理解できる。

3. 地球核の軽元素問題

では、核に水素等の元素が存在している可能性はあるのだろうか。実は、地球核は同じ圧力・温度における純鉄の密度よりも約8%軽く、これは鉄より軽い元素が核に存在し、密度を下げているためと考えられる。これを、地球核の密度欠損問題と言い、現在まで約70年もの間の未解決問題である⁵⁾。

密度を8%下げる元素量は、かなり膨大である。核は、地球全体の約1/3もの重さを占める。もし、水素だけが密度欠損の原因ならば、現在の海洋の100倍近い水が地球核に存在することになる。このように、核の軽元素の理解は、地球全体の化学組成を明らかにする上で、不可欠である。

核の軽元素候補は、Si, O, C, S, Hである。今回は水素に着目する。水素は、主に次の化学反応で核に分配されると考えられている。



しかし、この反応を検証する実験は難しく、分配係数を導いた研究は極めて少ない^{例えば6)}。これらの先行研究は、地球のコア形成よりも低い圧力での結果であるものの、水素は核に分配されやすいことを示した。一方で近年、核に水素は分配されないという真逆の結果も報告され、追試が待たれていた^{7,8)}。

4. 超高压・高温実験

コア形成条件での実験を可能にするツールがダイヤモンドアンビルセル(DAC)である(図3)。

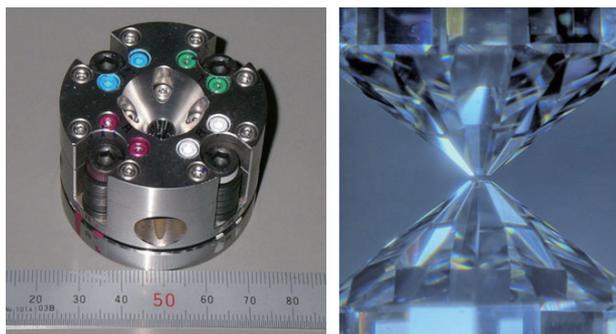


図3 DAC (左図) とその中心にあるダイヤモンド対 (右図)
試料はダイヤモンドの間に挟む

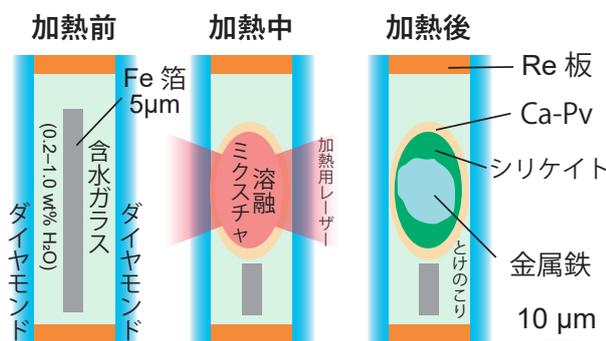


図4 実験試料構成の模式図

DACは直径5 cmの小さい装置だが、地球の中心条件(掌に東京タワーを100本載せた時の圧力に相当)に到達でき、地球深部探索の強力な道具になる。

今回の実験では、DACに、地球の核とマグマの模擬物質(鉄箔と水を含むシリケートガラス)を挟み、コア形成条件まで加圧する。そして、試料にダイヤモンドを通してレーザーを照射する。その結果、試料は約3,100~4,600 Kへと加熱され溶融、コア形成の条件が実際に再現される。その後、レーザーを止めて急激に常温に戻すことで、加熱時の化学組成をとどめた状態で固化させることができる(図4)。

こうした微小試料から高温・高圧その場での情報を得る手法が、放射光によるX線回折測定(XRD)である。大型放射光施設SPring-8のBL10XUでは0.2秒単位で~6 μmの領域のXRDパターン(図5)を取得できる⁹⁾。今回の実験では、試料の溶融前、溶融中、溶融後のXRDを取得し、鉄中の水素量を決定する。

こうして得られた加熱後のXRDパターンから、水素を含んだ合金が結晶化したことが分かる。その1つは、fcc FeHxであり、この合金は、水素を含ま

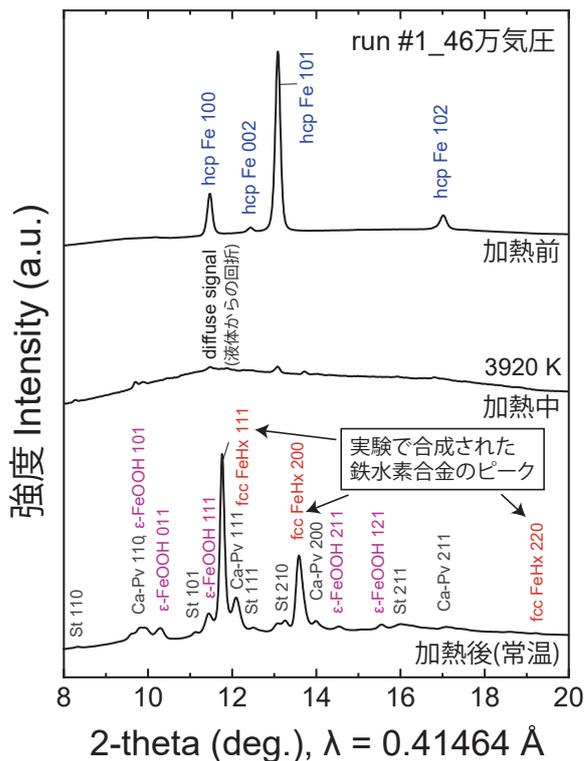


図5 放射光実験で得られたXRDパターン

加熱後に鉄水素合金が合成されたことが分かる

ないfcc Fe(γ相)に比べて、体積的に1割弱、膨張している。こうした水素の固溶によるFeの体積の膨張から、鉄に分配された水素量が分かる。

5. 超高压試料の二次イオン分析法(SIMS)

分配係数を決定するには、シリケート(マグマ)側の水素濃度も必要になる。しかし、DACで得られた微小領域(20 μm角)の試料から水素を定量した報告は、ほぼ存在しない。そもそも、水素を観察できる手法自体が限られ、既知のプロトコルもなかった。

検討した結果、北海道大学の同位体顕微鏡(二次元イオン検出器SCAPSを備えた結像型SIMS)を利用することになった¹⁰⁾。CAMECA社のims-1270に、SCAPS(積層タイプの能動型CMOS撮像素子)と結像型の二次イオン光学系を備えたこの装置は、高感度・高精度・広ダイナミックレンジでの同位体分析ができる¹¹⁾。また、SCAPSの各画素が検出器として機能するため、結像型のイオン光学系を通し

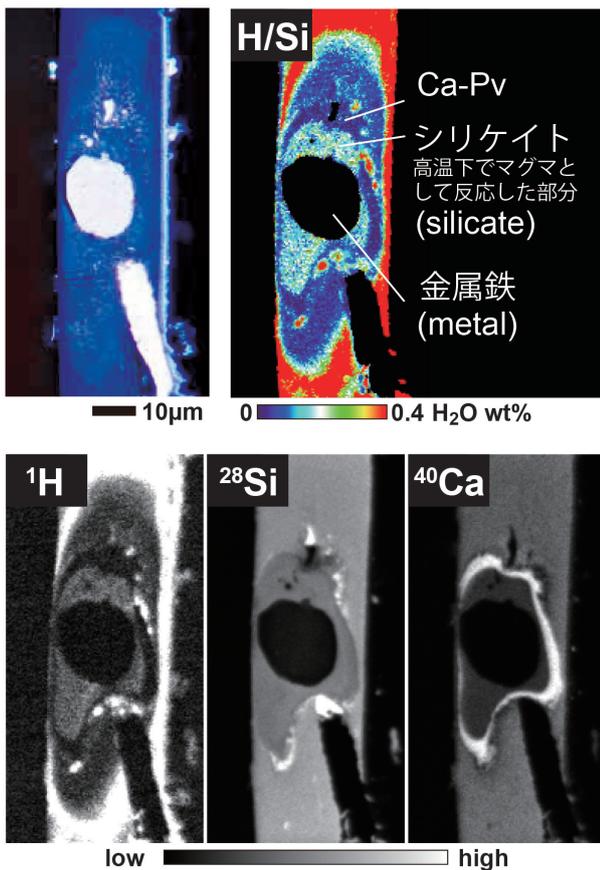


図6 同位体顕微鏡による分析結果
 上左：試料断面の光学顕微鏡写真，上右：同位体像から求まる断面中の水濃度分布，下： ^1H ， ^{28}Si ， ^{40}Ca の同位体像

て得られたイメージ自体が定量結果を示す。図6はこの手法による本実験の同位体像である。

6. 地球核の水素量

金属とシリケート（マグマ）間の水素の分配係数 $D_{\text{H}} = C_{\text{H}}^{\text{in metal, wt\%}} / C_{\text{H}}^{\text{in silicate, wt\%}}$ を図7に示す。 D_{H} が大きいほど、核に水素が分配されている。本研究の結果、30～60万気圧、3,080～4,560 Kで、 D_{H} は29～57程度となることが分かった。これは、同時期に公開された第一原理計算の結果とも調和的である^{例えば12)}。また、近年報告された水素の低い分配係数は、常圧回収後に鉄中の水素を定量したことに起因するのだろう。常圧・常温付近で鉄-水素合金が水素を失うことは、中性子線回折実験からも明らかになっている¹³⁾。

本研究では、実験的に初めて地球のコア形成条件（50万気圧、3,500 K）を挟んで水素の分配係数を決

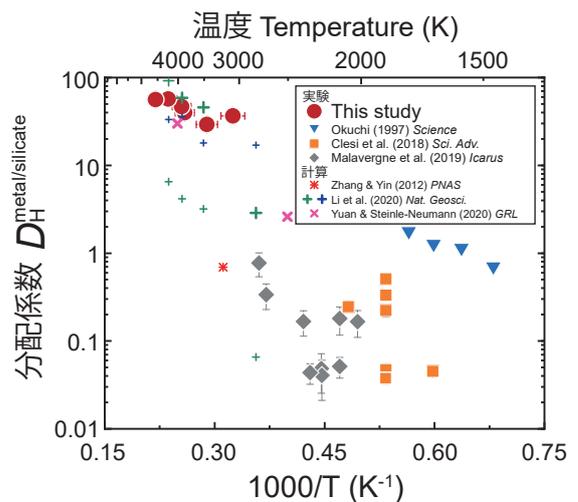


図7 本研究で得られた水素の分配係数（wt%で表示）と先行研究の分配係数の比較

定できた。また、得られた分配係数を用い、地球の成長に合わせて、より現実的なモデルでの核の水素量を見積るシミュレーションも行った。地球の形成時に地球にもたらされた物質はどれも水を含んでいると仮定する。惑星の最初期にできる大気は圧力が高く、そこに存在した水素・水は容易にマグマに溶解したはずだ。そのような水を多く含むマグマオーシャンが金属と反応すると、核に水素が分配される。そのとき、核の水素量は、現在の海に存在する水素の30～70倍相当にもなる。これこそが、海の量を調整した主要なメカニズムではないだろうか。同時に、惑星の起源物質が大量の水を含んでいようと、陸と海を共に持つ惑星を作れることを意味している。

これまで地球の起源物質に大量の水が含まれることは一見ナンセンスな仮説だと考えられてきた。しかし、本研究の結果は水が地球の起源物質に多分に含まれても良いことを意味する。地球の水の起源の候補はいくつかある。例えば、その1つがC型小惑星である。ここ数年で、はやぶさ2やOSIRIS-RExによるサンプルリターンの結果がもたらされ、C型小惑星の理解も進むだろう。また、太陽系初期の惑星系円盤の水素そのものがマグマオーシャンと反応し、水ができた可能性も指摘されている。そうした水のほとんどは核に取り込まれたはずだ。

一方、核の密度欠損を説明するには、水素以外の軽元素も核に存在する必要がある。核の化学組成が完全に理解された時、初めて地球全体の化学組成が決まり、地球の起源の理解が可能となる。

7. おわりに

地球の深いところを「見る」ことで、地球が生まれた当時の太陽系や宇宙の理解が進む。高压地球科学は、現在の地球を理解するだけでなく、地球の起源を解明する手段にもなっている。今回開発された、同位体顕微鏡やその他の表面分析を組み合わせた手法により、今後も様々な元素の地球内部での分配が理解されるだろう。同時に、放射光や中性子線といった放射線技術は、高压その場を垣間見る優れた方法として、今後ますます有用となるはずだ。

広大な宇宙の中にぽつんと存在する、水をたたえた地球。その起源がいま、明らかになりつつある。

謝辞

本研究は、北海道大学の坂本直哉助教・塚本尚義教授、東京大学の廣瀬敬教授と廣瀬研究室の皆様、

JASRI (SPring-8) のBL10XUの皆様を始めとする皆様の支援により実現しました。深く感謝致します。

参考文献

- 1) Tagawa, *et al.*, *Nat. Commun.*, **12**, 2588 (2021)
- 2) Fischer, *et al.*, *GCA*, **167**, 177-194 (2015)
- 3) Siebert, *et al.*, *Science*, **339**, 1194-1197 (2013)
- 4) Rubie, *et al.*, *Icarus*, **248**, 89-108 (2015)
- 5) Hirose, *et al.*, *Nat. Rev. Earth Environ.*, **2**, 645-658 (2021)
- 6) Okuchi, *Science*, **278**, 1781-1784 (1997)
- 7) Clesi, *et al.*, *Sci. Adv.*, **4**, e1701876 (2018)
- 8) Malavergne, *et al.*, *Icarus*, **321**, 473-485 (2019)
- 9) Hirao, *et al.*, *MRE*, **5**, 018403 (2020)
- 10) 塚本, 顕微鏡, **41**, 134-137 (2006)
- 11) 坂本, *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.*, **69**, 176-181 (2021)
- 12) Li, *et al.*, *Nat. Geosci.*, **13**, 453-458 (2020)
- 13) Iizuka-Oku, *et al.*, *Nat. Commun.*, **8**, 14096 (2017)

(東京工業大学 地球生命研究所)