

令和 6 年 6 月 28 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01177

研究課題名(和文)地球最古の鉱物に保存された微小包有物から地球の“水”の起源を読み解く

研究課題名(英文)Decoding the origin of Earth's water from micro-inclusions preserved in oldest terrestrial minerals

研究代表者

山本 伸次(Yamamoto, Shinji)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授

研究者番号：30467013

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：西豪州・ジャックヒルズ堆積岩に含まれる碎屑性ジルコン中およびそこに残存するアパタイト包有物の水素同位体比を分析した結果、約36億年前の地球マントルの水素同位体比(D)は現在のマントルの D 値と比べ著しく低い値(-354 ± 23)を示すことが明らかとなった。このような低い D を持つためには地球の水の起源物質として原始太陽系円盤ガスにおける水素を地球が獲得した可能性が高く、今後のさらなる分析によりその真相が明らかとなることが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題で示された「約36億年前のマントルの水素同位体比は -354% であった」というデータは、地球の「水」の起源に関する従来の知見を覆すものであり、この手法をさらに拡張することで従来より仮説として提唱されている「コンドライトや彗星物質の後期重爆撃による水の付加」や「地球大気の水素散逸の変動」などが具体的なデータに基づき検証可能となり、地球形成進化史における惑星科学研究および地球史研究に対して重大な波及効果をもたらすことが予想される。

研究成果の概要(英文)：Hydrogen isotope ratios of apatite inclusions in detrital zircons in the Jack Hills sedimentary rocks of Western Australia indicate that the Earth's mantle 3.6 billion years ago had significantly lower D values (-354 ± 23) than those of the mantle today. The low D value suggests that the Earth may have acquired hydrogen from the primordial solar nebula gas, and further analysis is expected to elucidate the origin of Earth's water.

研究分野：地質学、岩石・鉱物学、同位体地球化学

キーワード：初期地球 水の起源 碎屑性ジルコン アパタイト包有物 水素同位体比

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地球における水の存在は、生命の誕生や進化のみならず惑星進化において重要であるが、その起源については未だ統一した見解は得られていない。近年、地球の水の起源論に対して、理論研究や観測・分析的側面から「地球の水は原材料物質であるコンドライト隕石によりもたらされた」とする「常識」を覆す事実が続々と示されている。例えば、月の玄武岩に含まれるアパタイト (Ca₅(PO₄)₃(Cl, F, OH)) の水素同位体分析によると、地球の水素同位体組成と比べると2倍の重水素が含まれていることが判明している。このような重水素に富む水は太陽系において彗星の水氷しかなく、地球においても同様に彗星から多量の水の供給があったと考えられる (図1)。

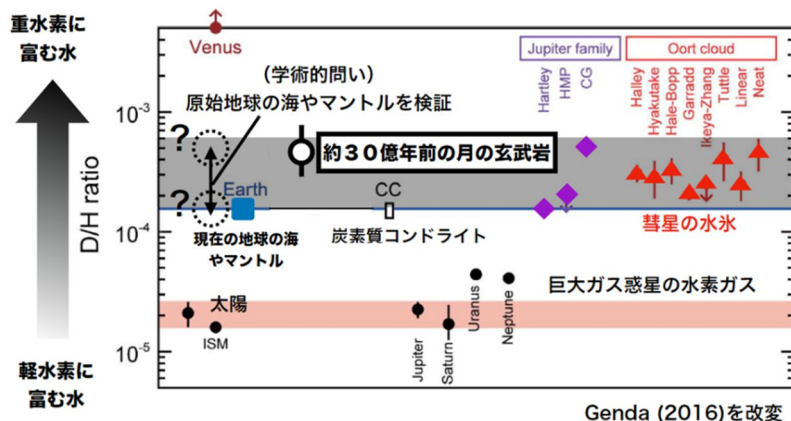


図1 太陽系天体における水素-重水素の割合 (δD).

一方で、マントル深部由来の岩石 (海洋島玄武岩) のメルト包有物の水素同位体比は-100 ‰と低い値を示すことから、地球が獲得した水 (水素) は、地球形成当時、周囲に存在していた水素同位体比の低い原始惑星円盤ガスが起源である可能性が示唆されている。このように、地球の水の起源に関しては、(1) 微惑星 (コンドライト) に含まれる水、(2) 原始太陽系円盤ガスに含まれる水素、(3) 彗星の水氷、これら3つの可能性がそれぞれ独立の観測データから提唱されている状況にあるが、それぞれを矛盾なく説明するシナリオは描かれていない。これを解決に導くため、初期地球における水素同位体比データの取得が望まれるが、そのための最適な地質試料が残存していないという問題を抱えている。

2. 研究の目的

上記の問題を解決すべく、本研究課題では地球最古の地質記録であるジルコン鉱物 (ZrSiO₄) の中に保存されたアパタイト包有物に着目し、この水素同位体比を測定することで、地球における水の起源解明を目指す。ジルコンは物理化学的に堅牢な鉱物であり、U-Pb 法により絶対年代を決定できると同時に、そこに含まれる含水鉱物やアパタイト鉱物から水素同位体比が測定可能である。我々のこれまでの数万粒に上る砕屑性ジルコンの回収および観察から、その存在率は極めて小さいものの、40億年以前の年代を示す砕屑性ジルコン中に包有鉱物としてアパタイトの存在を確認されており (図2) 予察的研究からこのアパタイト包有物は非常に低い水素同位体比を示すことが明らかとなった。この砕屑性ジルコン中のアパタイト包有物が保持する水素同位体比を系統的に分析し、地球形成初期段階 (約40-44億年前) における地球の水素同位体比を追跡することにより、地球における水の起源を推定可能であると期待される (図3)。

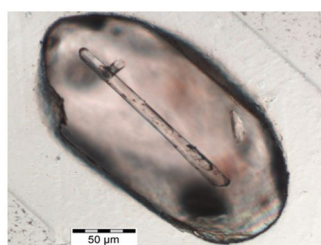


図2 西豪州・ジャックヒルズジルコン中のアパタイト包有物 (山本撮影)

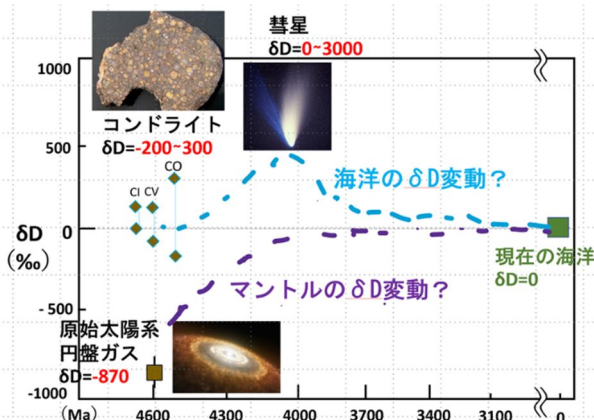


図3 太陽系天体における水素-重水素の割合 (δD) およびマントルと海洋の δD 進化曲線。

3. 研究の方法

上記の課題を解決するため、本課題では様々な機器をもちいた各種分析をおこなった。特に電子線照射やレーザー加熱が引き起こす二次的な水素同位体比の変動を極力回避するための適切なプロトコルを確立させた。

(1) 試料準備～アパタイト包有物の同定・回収まで：横浜国大

岩石試料の粉碎および重鉍物分離
サイクロン式選鉱機によるジルコンの大量・迅速選別
アクリル樹脂埋め・鏡面研磨仕上げ
アパタイト包有物の探査 (Laser Raman & EDS 分析)
SEM-CL によるジルコンのカソードルミネッセンス像撮影

(2) SIMS によるアパタイト包有物の水素同位体比分析：京都大学

ジルコンをアクリル研磨樹脂から回収し、SIMS 分析用にインジウムへ再包埋
SIMS によるアパタイトの水素同位体比分析

(3) LA-ICPMS による年代分析：東京大学

水素同位体分析が完了したジルコンの U-Pb 年代分析
ジルコンの希土類元素や Sc などの微量元素分析

(4) EPMA を用いたアパタイト包有物の微量元素分析：横浜国大

分析条件の確立 (照射電流・電圧・分析時間・標準試料準備)
アパタイトの Sr、Y、Zr などの微量元素分析

4. 研究成果

世界最古のジルコンを産する西豪州・ジャックヒルズ堆積岩、および世界最古の火成岩であるアカスタ片麻岩・ラブラドル片麻岩に含まれるジルコン鉍物を分離回収し、そこに残存するアパタイト包有物の水素同位体比分析さらに碎屑性ジルコンのマグマ起源を明らかにするため、ジルコン微量元素分析 (Sc/Yb など) およびアパタイト包有物の微量元素分析 (Sr/Yb など) をおこなった結果、マントル由来マグマの化学的特徴を有するジルコンおよびアパタイトの識別が可能となった。また約 36 億年前のジルコン中アパタイト包有物はマントル由来でありその水素同位体比として $-354 \pm 23 \text{‰}$ を示すことから、少なくともその時代のマントルの水素同位体比は現在のマントル水素同位体比より明らかに低く、同時に、既往研究から報告されている南アフリカ・バーバートン緑色岩体のメルト包有物から得られた約 34 億年前の低い水素同位体比データと矛盾せず、ジルコン中アパタイトはその水素同位体比を現在まで確実に保持していることが明らかとなった。一方で、島弧起源マグマに由来すると考えられるジャックヒルズ・ジルコン中アパタイトの水素同位体比は、初期太古代岩石 (カナダ・アカスタ片麻岩：約 38 億年前、ラブラドル片麻岩：約 39 億年前) の水素同位体比データと矛盾せず (図 4 中の緑) ジルコン中アパタイトの水素同位体比の保存性が確認された。このような低い水素同位体比を有する水の起源物質としては、原始太陽系円盤ガスの取り込みの可能性が高いことが世界で初めて実証的なデータから明らかとなった。当初の目的であった初期地球における水素同位体比進化曲線の完成には至らなかったものの、本研究課題の手法の新規性妥当性が実証されたといえよう。

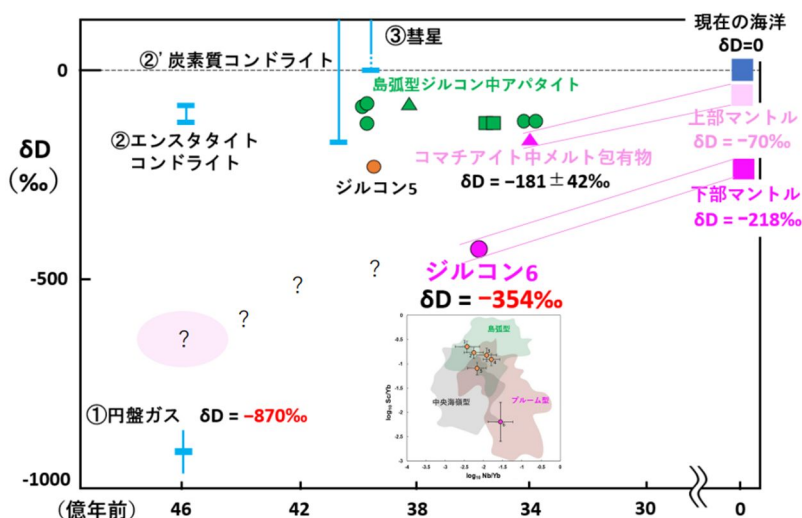


図4 太陽系天体における水素 重水素の割合 (D) および 34 億年前のジルコン中アパタイトの水素同位体比 (ジルコン 6)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 森下 知晃, 藤江 剛, 平内 健一, 片山 郁夫, 瀧澤 佑衣, 黒田 潤一郎, 岡本 敦, 小野 重明, 道林 克禎, 諸野 祐樹, 山本 伸次	4. 巻 130
2. 論文標題 マントル掘削でのみ解明される地球科学問題	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地学雑誌	6. 最初と最後の頁 483-506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.130.483	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋 真里花, 横山 晶, 坂田 周平, 澤木 佑介, 山本 伸次, 深海 雄介, 大野 剛, 小宮 剛
2. 発表標題 冥王代ジルコン中のSc/Ybの評価法の検討
3. 学会等名 日本地球化学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日比谷 由紀, 吉屋 一美, 飯塚 毅, 山本 伸次, 小宮 剛, 鈴木 勝彦
2. 発表標題 パーバートン緑色岩体における隕石衝突起源スフェールの探索
3. 学会等名 日本地球化学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横山 晶, 坂田 周平, 仁木 創太, 平田 岳史, 澤木 佑介, 山本 伸次, 深海 雄介, 大野 剛 著者情報
2. 発表標題 冥王代ジルコン中の微量元素から読み取る初期地殻生成過程の変遷
3. 学会等名 2021年度日本地球化学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	平田 岳史 (Hirata Takafumi) (10251612)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授 (12601)	
研究 分担者	伊藤 正一 (Ito Shoichi) (60397023)	京都大学・理学研究科・准教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------