

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14790

研究課題名(和文) 隕石の同位体記録を用いた、岩石惑星の水獲得プロセスの解明

研究課題名(英文) Elucidation of origin of water on rocky planets using isotopic records in meteorites

研究代表者

小池 みずほ (Koike, Mizuho)

広島大学・先進理工系科学研究科(理)・助教

研究者番号：60836154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：かつての微惑星や原始惑星を起源とする隕石群には、岩石惑星(地球型惑星)形成領域の様々な記録が残されている。本研究では、岩石惑星の揮発性物質獲得と表層環境の進化過程を明らかにすることを目的に、小惑星ベスタなどを起源とする複数種類の分化隕石を対象に、二次イオン質量分析計ナノSIMSによる局所放射年代測定と、岩石組織観察および安定同位体分析を実施した。これまでの研究から、小惑星帯における主要な天体衝突イベントが比較的初期に集中していたことが分かり、岩石惑星領域への物質移動・供給は、遅くとも41.5億年前までに完了していたことが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小惑星起源の試料には、地球や月以前の記録が残されている。従来、月試料などの同位体記録から、地球を含む岩石惑星領域での天体衝突は約39億年前(形成から6-7億年後)に急激に増加したと予想されてきた。本研究から、小惑星帯における主要な天体衝突は約45億-41.5億年前という比較的早い段階で完了していたことが示され、岩石惑星領域における物質移動と供給時期について新たな知見が得られた。太古の天体衝突と物質供給は、地球や火星における原始海洋の形成や最古の生命誕生にも関わる問題である。本研究の成果は、地球を始めとする惑星古環境進化の解明に貢献すると期待される。

研究成果の概要(英文)：This study focused on geochemical records in the ancient differentiated meteorites, which are believed to have originated from remnant planetesimals or protoplanets. Rocky meteorite groups named howardite, eucrite, and diogenite (called HED) are considered as initial crustal materials of asteroid 4-Vesta, that recorded various processes among the rocky planets region. To understand the origin of volatiles and evolution process of rocky planets, I have conducted in-situ radiometric dating by a secondary ion mass spectrometer (NanoSIMS) along with petrological observations and stable isotopic analysis of several differentiated meteorites, including HED and other samples. Based on this study, it is suggested that the collisional rate of the rocky planets region was much higher at early stage and decreased monotonically. Major collisional events should have ceased by 4.15 billion years ago, inferring that supply of volatiles ended before that time.

研究分野：宇宙地球化学

キーワード：分化隕石 小惑星 放射年代測定 二次イオン質量分析計

1. 研究開始当初の背景

地球や火星などの岩石を主構成要素とする天体（岩石惑星または地球型惑星）の環境進化を理解するうえで、水などの揮発性成分の挙動の解明は重要である。水は、岩石惑星の集積～初期進化過程において、いつ、どこから、どの程度もたらされたのだろうか。この問を明らかにするためには、惑星形成よりも古い物質記録を参照する必要がある。そこで本研究では、太古の小惑星由来の分化隕石および始原的分化隕石（以降、まとめて分化隕石と呼ぶ）の同位体化学記録に注目した。

分化隕石の起源天体である「分化した微惑星」は、約46億年前の初期太陽系で集積し、放射性元素の壊変熱による全球的または部分的な溶融・分化を経験した岩石天体である。こうした分化微惑星は現在ではほとんど残されておらず、その欠片である分化隕石の物質記録は太陽系の初期進化を探るうえで重要だと言える。特に、一部の隕石群（HED隕石）は大型の岩石小惑星ベスタとの関連性が指摘されている。複数種類の分化隕石を調べることで、ベスタと他の小惑星帯天体との共進化過程を明らかにできれば、太陽系全体の形成進化史の解明につながると期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、岩石惑星の材料とも言える分化微惑星の形成進化史を分化隕石から明らかにすることである。特に、隕石が記録する形成／変成年代の情報と、揮発性成分などの同位体化学情報を局所分析で調べ、詳細な岩石鉱物観察と合わせることで、隕石母天体の複雑な歴史を解明する（図1）。様々な隕石の記録を総合することで、岩石惑星の水の起源の問題に迫ることを究極目的とした。

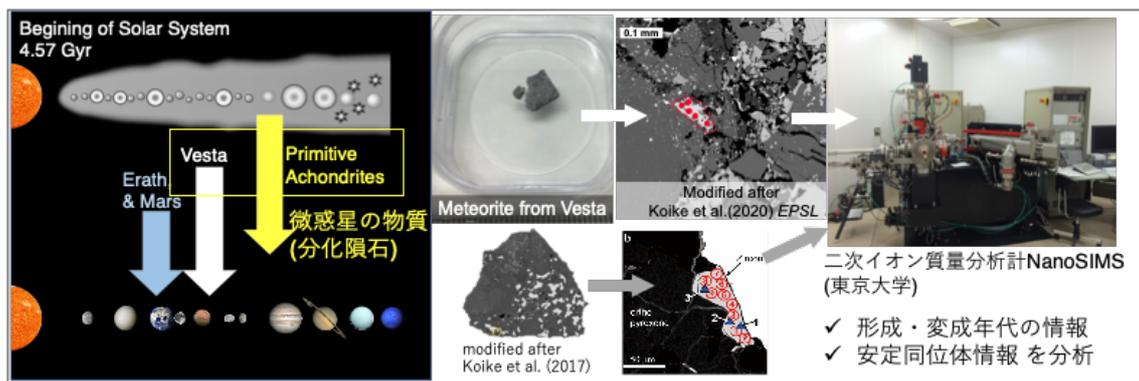


図1. 研究対象とした分化隕石（左）と、その電子顕微鏡画像の一例（中央）。直径50 – 100ミクロンの微小鉱物に含まれる同位体記録を局所分析で調べる。（右）

3. 研究の方法

本研究では複数の分化隕石を対象とし、以下①～③の分析を実施した。試料の多くは小惑星ベスタ起源のHED隕石に分類されるが、バリエーションを増やすために未知の小惑星由来の分化隕石も対象に含んでいる。

① 各試料は予め薄片加工を施した後、走査型電子顕微鏡（SEM-EDS）等による岩石組織観察を行い、隕石の熱変成・衝撃変成の痕跡を調べた。同時に、次の年代測定に適した微小鉱物粒（アパタイト $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})]$ など）を特定した。各鉱物の主要元素組成は、すべての年代測定および同位体分析が完了した後に、電子線マイクロプローブアナライザ（EPMA）を用いて定量評価した。

② 観察した各試料について、東京大学保有の二次イオン質量分析計（NanoSIMS 50）を利用して局所ウラン-鉛年代測定を実施した（図1）。ウラン-鉛年代法は、あらゆる地球外試料に適用可能な汎用性の高い絶対年代測定法である。本手法で十分に古い形成年代（およそ45.5億年以前）が得られた試料については、初期太陽系にのみ適用可能な相対年代測定（ハフニウム-タングステン年代法やアルミニウム-マグネシウム年代法など）を追加実施することを予定した。

③ 上記でウラン-鉛年代を求めた各試料について、アパタイト等に含まれる水(H)や塩素(Cl)の安定同位体組成を二次イオン質量分析計による局所分析で調査する。この分析には、東京大学のNanoSIMS 50を利用した他、英国オープン大学の研究グループにも協力いただき、同大学が所有するNanoSIMS 50Lでの予察的な分析を予定した。大部分の隕石は複雑な熱変成・衝撃変成を経験しているが、天体衝突の痕跡が見られない試料からは微惑星の初生的な同位体情報が得られ、衝撃の影響が顕著な試料からは天体衝突時の水などの情報が得られると期待した。

4. 研究成果

これまでの研究、特に研究手法①～②の結果から、小惑星ベスタの衝突進化史が明らかとなった。具体的には、ベスタ起源(HED)隕石に含まれるアパタイトなどの微小鉱物について、NanoSIMSによる局所ウラン-鉛年代測定を実施した結果、衝撃変成の痕跡を持つ隕石からは約44億年～41.5億年の変成年代が得られた(図2)。これは、この時代に、ベスタが比較的大規模な天体衝突を複数回経験したことを示唆する。一方、顕著な衝撃の痕跡を持たない隕石からは45億年以前の変成年代が得られ(図2)、かつてのベスタ地殻内部での冷却過程が記録されていることが明らかとなった。ただし、いずれの隕石も45.5億年よりは若く、相対年代法には適さないことが分かった為、ウラン-鉛年代結果のみに基づいて以降の議論を進めた。

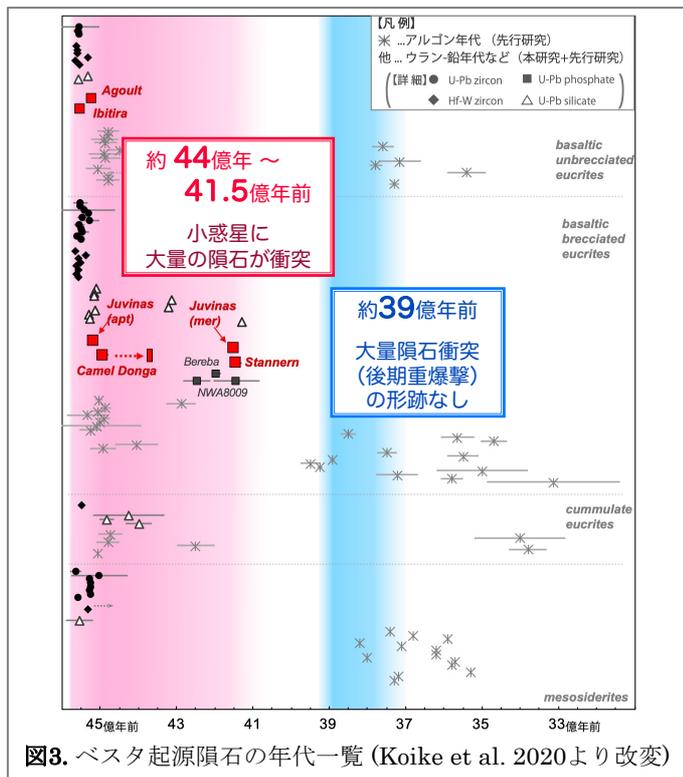
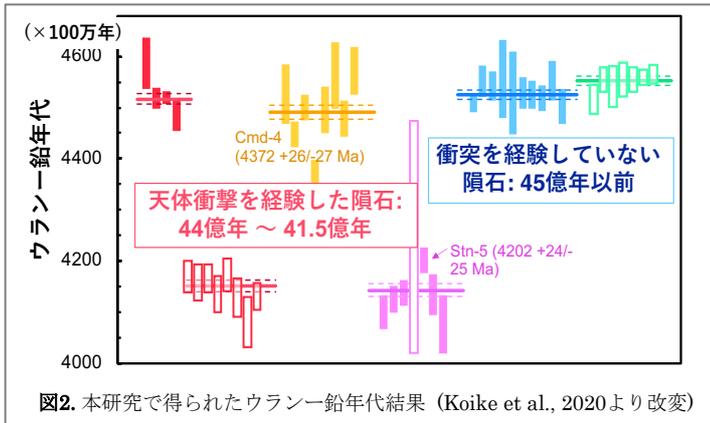
今回得られた年代値を、先行研究で報告されている他の年代データ(カリウム-アルゴン年代など)と比較したところ、かつてベスタが経験した天体衝突は、集積直後(約45億年前)が最も激しく、その後徐々に穏やかになり、41.5億年までに主要な衝突イベントが終了したことが明らかとなった(図3)。これは、地球や月への小天体衝突頻度が約39億年前に急激に上昇したとする「後期重爆撃仮説」に矛盾する。本研究の成果は、少なくとも小惑星帯

においては「後期重爆撃」のような衝突ピークが存在しなかったことを示唆しており、太陽系物質の動径方向の輸送が、惑星集積段階～集積直後のごく初期の期間に完了していた可能性を示唆するものである。今後、他の小惑星物質や火星・月などの惑星物質の衝突年代記録を精査し、ベスタの結果と比較検証することで、太陽系全体の初期5億年程度の衝突進化史を解明できると期待する。

一方、これらの隕石について③水素、塩素同位体分析を試みた。予察的なデータは得られたものの、濃度が低いことと試料汚染が顕著であったことが原因で、有意な同位体比を決定できない結果となった。水素などの濃度が低い原因は、隕石の熱変成・衝撃変成時の脱水などが考えられる。今後、低濃度試料に適した試料準備法および分析プロトコルを改良することで、これらの同位体比を再評価できると考える。

<参考文献>

Albarede (2009) Nature, 461, 1227.
 Krot et al. (2014) Treatise on Geochemistry, 2nd Edition, 1, 1-52.
 DeMeo and Carry (2014) Nature, 505, 629-634.
 Morbidelli et al. (2018) Icarus, 305, 262-276.
 Koike et al. (2016) Geophys. Res. Lett., 44.
 Koike et al. (2020) Earth Planet. Sci. Lett. 549, 116497.



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Koike Mizuho, Sano Yuji, Takahata Naoto, Iizuka Tsuyoshi, Ono Haruka, Mikouchi Takashi | 4. 巻 549 |
| 2. 論文標題 Evidence for early asteroidal collisions prior to 4.15 Ga from basaltic eucrite phosphate U-Pb chronology | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters | 6. 最初と最後の頁 116497 ~ 116497 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.epsl.2020.116497 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Sumiya, Y., Koike, M., Onishi, K., Kurokawa, A., Takahata, N., Asanuma, H., and Sano, Y. |
| 2. 発表標題 Uranium-lead dating of zircon and phosphate minerals in a highly-shocked eucrite Northwest Africa 13166 |
| 3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference（国際学会） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小池みずほ, 佐野有司, 高畑直人 |
| 2. 発表標題 隕石の放射年代分析から探る小惑星の衝突進化史 |
| 3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

(広島大学 論文プレスリリース) 40億年前より古い大量隕石衝突の痕跡を発見
<https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/59830>
Remnants of an ancient asteroid shed new light...
https://www.eurekalert.org/pub_releases/2020-09/hu-roa092420.php

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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|