

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03946

研究課題名(和文)小惑星ベスタの形成初期における大規模衝突破壊の年代学的検証

研究課題名(英文) Investigating chronological evidence of a giant impact in the early history of asteroid Vesta

研究代表者

羽場 麻希子 (Haba, Makiko)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：30598438

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：小惑星ベスタの形成初期における巨大衝突の可能性を探るため、ベスタ由来の隕石であるHED隕石の年代測定を行い、年代学的な検証を行った。まず、玄武岩質ユークライト中のジルコンを用いて高精度U-Pb年代分析を行い、衝突の年代が得られるかを検証した。本研究で用いたCamel Donga隕石のジルコンの年代は、従来法と比べて年代に伴う誤差1/10以下まで低減することに成功したが、用いたジルコン粒子はいずれも地殻形成年代を示した。また、ホワルダイト全岩試料を用いた $^{244}\text{Pu-Xe}$ では、ベスタの初期進化に相当する年代が得られたが、巨大衝突の年代の検出には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小惑星ベスタにおける巨大衝突の可能性を探るため、ジルコンの高精度U-Pb年代測定法の改良に取り組んだ。HED隕石中のジルコンはベスタの地殻の初期進化を考える上で重要な年代情報を与えるが、ジルコンの粒径が小さいため、二次イオン質量分析計を用いた年代測定が行われている。この手法では年代に対して2000年以上の誤差がつくため、初期イベントを年代学的に分離するために高精度な年代が必要とされている。本研究では年代誤差を100万年以下に低減することに成功しており、本手法が複数のHED隕石に適用されることで、ベスタの地殻の形成史が明らかになり、原始惑星の進化プロセスへの理解が深まることが期待される。

研究成果の概要(英文)：To explore the possibility of giant impacts during the early formation of asteroid Vesta, age measurements of HED meteorites, which originate from Vesta, were conducted for geochronological verification. Firstly, high-precision U-Pb dating was performed using zircons in basaltic eucrites to verify if the age of the impacts could be determined. The age of zircons in the Camel Donga meteorite, used in this study, successfully reduced the error margin associated with traditional methods to less than one-tenth. However, all the zircon grains analyzed indicated the age of crust formation. Additionally, the $^{244}\text{Pu-Xe}$ dating of whole rock howardite samples yielded ages corresponding to the early evolution of Vesta, but did not detect the age of a giant impact.

研究分野：Geochemistry

キーワード：Vesta zircon U-Pb Pu-Xe HED meteorite

1. 研究開始当初の背景

小惑星ベスタは木星と火星軌道の間が存在する小惑星帯で 2 番目に大きな天体である。直径約 500 km のこの天体はコア・マントル・地殻から成る分化構造を持つとされ、分化隕石の最大グループである HED 隕石の母天体であると考えられている。HED 隕石の物質科学的研究は、ベスタが 45 億年より古い地殻を保持することを示している。一方で、2011~2012 年にかけて行われた Dawn 探査 (NASA) は、観測データから現在のベスタに関する物理的・化学的情報を提示している。このように、ベスタは隕石を用いた物質的研究と探査機による観察が行われている唯一の小惑星である。ベスタにおける隕石研究と探査研究は、双方の研究の組み合わせによる原始惑星の形成と進化を考える上で重要である。

Dawn 探査の結果、現在のベスタ表面は HED 隕石のホルワライト隕石群に類似する組成を示し、HED 隕石がベスタに由来することを補強する結果となった。しかし一方で、ベスタの地殻の厚さの見積りは隕石研究と探査研究で大きな矛盾を抱えている。まず、隕石の研究から、ベスタは 30~60 km の原始地殻を保持し分化した内部構造を現在まで保持する稀有な天体と考えられてきた。しかし、探査の結果、南半球を覆う巨大クレーター内にマントル物質であるオリビンが検出されないため、ベスタの地殻は 85 km 以上に達することが明らかになった。この地殻の厚さの矛盾はいまだに解決されていないが、ベスタに由来するもう一つの隕石グループ・メソシデライトから、ベスタが今から約 45.2 億年前に巨大衝突を経験し、ベスタ南極域における地殻の厚さが変化したとする説が提唱されている。

2. 研究の目的

小惑星ベスタが今から 45 億年前に巨大衝突を経験していた場合、原始地殻を構成していた HED 隕石の放射壊変系は衝突時の熱の影響で一旦リセットされた可能性が高い。しかし、ベスタの地殻はその後絶えず小規模な衝突の影響を受けるため、低温でリセットする放射壊変系は巨大衝突の年代検証には利用できない。そこで、本研究では比較的高温でリセットする放射壊変系で HED 隕石に適用できる Pu-Xe 年代に着目した。また、巨大衝突の痕跡を残すメソシデライト隕石中には衝突による岩石部分の部分熔融によってジルコンが晶出したことが判明している。ジルコンの U-Pb 放射壊変系は形成後の衝突に対して強い耐性を持つため、HED 隕石中のジルコンの年代は形成年代を示すと考えられる。そこで本研究では、ベスタの最表面部を構成していたと考えられる玄武岩質ユークライトのジルコンの高精度 U-Pb 年代分析および全岩 Pu-Xe 年代分析を行い、巨大衝突に対応する年代が得られるのかを検証した。

3. 研究の方法

(1) 玄武岩質ユークライトに属する隕石の Camel Donga では、Pu-Xe 年代として 45.2 億年が報告されており、二次イオン質量分析計を用いたジルコンの Pb-Pb 年代では 45.3 億年の年代が報告されている。これらの年代が巨大衝突に対応するのかを調べるため、Camel Donga 隕石中のジルコンに対して、高精度 U-Pb ID-TIMS 法によって年代分析を行った。この手法自体は地球のジルコンで広く利用されている年代測定法であるが、玄武岩質ユークライトのジルコンは非常に小さく存在度も小さいため、ジルコン粒子の分離・濃縮法を立ち上げる必要があった。まず、玄武岩質ユークライトをフッ酸と硝酸の混酸で分解し、その酸残渣からジルコン粒子を実体顕微鏡下で回収した。しかし、この方法では、混酸での分解中にジルコン中の U と Pb の間で分別が起こる可能性がある。そこで、混酸での分解前に玄武岩質ユークライトの岩片を石英ガラスのつぼに入れ、900 °C で 48 時間のアニーリング処理を施してから混酸の分解を開始する方法も試した。回収したジルコンは高压高温酸分解容器を用いて完全分解し、イオン交換樹脂による Pb および U の単離後、TIMS を用いて U-Pb 年代分析を行った。

(2) Pu-Xe 年代測定では、親核種である Pu が短寿命核種で存在しないため、化学的挙動の類似する軽希土類元素の濃度が必要となる。本研究では 5 つのホルワライト隕石 (NWA 1929, NWA 6920, Y-000428, Y-003125, Y-7308) について微量元素定量分析と希ガス同位体分析を行った。

4. 研究成果

まず、Camel Donga のジルコンの U-Pb 年代に関して、アニーリング処理を施さない方法では得られた U-Pb データは明らかにコンコーディア曲線から外れ、207Pb-206Pb 年代も大きくばらつく結果となった。この結果は、ジルコンを隕石試料から分離するために行った酸処理がジルコンの U-Pb 系を乱した結果と考えられる。次に、アニーリング処理 (900 °C, 48 時間) を施したジルコンでは U-Pb データはディスコ ディア直線上にプロットされ、その 207Pb-206Pb 年代は 4552.58 ± 0.69 Ma に収束することが示された。本実験の成果として、玄武岩質ユークライト中のジルコンの高精度 U-Pb 年代測定を行うには、試料準備の段階で (1) 900 °C、48 時間の annealing を行い、ジルコンの結晶度を回復すること、(2) フッ酸と硝酸の混酸でジルコン内の結晶度の低い部分の除去を行うこと、が有効であることが明らかになった。本手法では従来の SIMS 法によるジルコンの Pb-Pb 年代と比べて年代誤差を 1/10 以下にまで低減することに成功した。本研

究では Camel Donga のジルコンを 9 粒子測定したが、従来の研究で報告されていた若い形成年代を持つジルコンは検出されなかった。今後、本研究で確立した手法を複数の HED 隕石に適用することで、巨大衝突の年代学的証拠を見いだせるかもしれない。

一方で、5つのホワルダイト隕石の $^{244}\text{Pu-Xe}$ 年代は 44.8~45.6 億年の年代を示した。これらの年代はベスタの初期進化に対応すると考えられるが、衝突の年代を検出するには年代の高精度化とデータ数の増加が必要である。一方で、本研究で使用したホワルダイト隕石は落下隕石であるため、軽希土類元素濃度が地球での汚染によって変動しており、 $^{244}\text{Pu-Xe}$ 年代が試料によってずれている可能性もある。ベスタにおける初期の巨大衝突を年代学的に検証するには、多数の HED 隕石の分析が必要であり、必然的に砂漠隕石を含む発見隕石を利用しなければならない。そのため、今後の研究ではジルコンの高精度 U-Pb 年代測定法を含めた地球汚染の影響を受けない年代測定法を実施していく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Keisuke Sugiura, Makiko K. Haba, Hidenori Genda	4. 巻 379
2. 論文標題 Giant impact onto a Vesta-like asteroid and formation of mesosiderites through mixing of metallic core and surface crust	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114949
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2022.114949	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Haba Makiko K., Nagao Keisuke	4. 巻 56
2. 論文標題 Cosmogenic noble gas nuclides in zircons from the Estherville mesosiderite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 992 ~ 1004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13660	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Haba Makiko K., Lai Yi-Jen, Wotzlaw Jorn-Frederik, Yamaguchi Akira, Lugaro Maria, Schonbachler Maria	4. 巻 118
2. 論文標題 Precise initial abundance of Niobium-92 in the Solar System and implications for p-process nucleosynthesis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2017750118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2017750118	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Haba Makiko K., Wotzlaw Jorn-Frederik	4. 巻 567
2. 論文標題 ID-TIMS zircon U-Pb geochronology of the Camel Donga eucrite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 120073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2021.120073	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Makiko K. Haba, Jorn-Frederik Wotzlaw, Yi-Jen Lai, Akira Yamaguchi, Maria Schonbachler	4. 巻 12
2. 論文標題 Mesosiderite formation on asteroid 4 Vesta by a hit-and-run collision	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Geoscience	6. 最初と最後の頁 510-515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41561-019-0377-8	査読の有無 有
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 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 羽場麻希子、長尾敬介
2. 発表標題 隕石ジルコンを用いた宇宙線照射年代測定法
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽場麻希子
2. 発表標題 消滅核種二オブ92の太陽系初生存在度の高精度決定
3. 学会等名 第68回日本地球化学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 羽場麻希子、Jorn-Frederik Wotzlaw
2. 発表標題 隕石ジルコンの高精度CA-ID-TIMS U-Pb年代測定
3. 学会等名 2020年度 日本地球化学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makiko K. Haba, Jorn-Frederik Wotzlaw, Yi-Jen Lai, Akira Yamaguchi, Maria Schonbachler
2. 発表標題 Chronological Evidence for Mesosiderite Formation on Vesta by a Hit-and-Run Collision
3. 学会等名 The 82nd Annual Meeting of the Meteoritical Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 羽場麻希子, Jorn-Frederik Wotzlaw, Yi-Jen Lai, 山口亮, Maria Schonbachler
2. 発表標題 小惑星ベスタでの巨大衝突によるメソシデライトの形成
3. 学会等名 2019年度 日本地球化学会年会
4. 発表年 2019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

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