

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25707042

研究課題名(和文)原始惑星の含水量推定

研究課題名(英文)Deciphering water contents in planetesimals

研究代表者

飯塚 毅(Iizuka, Tsuyoshi)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70614569

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,700,000円

研究成果の概要(和文)：惑星進化の諸段階過程における水及び揮発性元素の挙動を探るため、様々な隕石試料について年代分析、微量元素濃度分析、水素同位体分析を実施した。その結果、地球と同程度揮発性元素濃度に枯渇している隕石中にも水が含まれていること、それらの隕石の形成年代は太陽系形成から約1000万年以内であること、それらの隕石の一部の水の同位体組成は、地球の海水の同位体組成と一致することが明らかになった。これは、地球の水はコア形成後にコンドライト隕石などの水に富む天体の付加によってもたらされる(レイトベニヤ仮説)必要はなく、地球の集積時には既に水が存在していた可能性を示唆する。

研究成果の概要(英文)：To decipher the behaviors of water and other volatile components during planetary formation, we have conducted geochronology, geochemistry, and hydrogen isotopic study on various meteorite samples. We found that (1) some meteorites are depleted in volatile elements in similar degrees to the Earth but they possess water, (2) their formation ages are within ~10 million years after the solar system formation, and (3) a part of the meteorites and the Earth's water exhibit identical hydrogen isotopic compositions within analytical uncertainty. These findings imply that the Earth could have water since its accretion, thereby eliminating the requirement that the Earth's water was delivered by water-rich planetary materials such as chondrites after the Earth's core formation.

研究分野：惑星地球化学

キーワード：水 年代測定 微惑星

## 1. 研究開始当初の背景

海洋の存在は、地球を特徴づける重要な要素の一つであり、生命及び表層環境の進化に重要な役割を果たしてきた。また、水は鉱物中にも水酸基として存在し、地球マントルには、現海洋の～10倍の水が含まれる。マントル中の水は、マントルの融点や粘性を著しく低下させ、地震の発生にも大きく関わっている。また、最近の研究により、地球以外にも火星には液体の水が断続的に存在し、月や金星にも、固体水(氷や含水鉱物)及び水蒸気が存在していることが明らかになってきた。しかし、これら地球型惑星の水が、いつ、どこから、どのようにもたらされたのかについては、様々な仮説が提唱されているものの、未だに良く分かっていない。太陽系内における地球型惑星の形成・成長過程は、主に(1)原始太陽系星雲内でのダストの形成・集積による微惑星(kmサイズ)形成、(2)微惑星の衝突・暴走成長による原始惑星(数百km～火星サイズ)形成、(3)火星サイズ原始惑星の巨大衝突による地球型惑星及び月の形成、に分けられる(図1)。そして、これまでに提唱されている水の起源の仮説は、以下のように3つに分類できる。

### 仮説[1]: 氷微惑星の集積

氷微惑星が衝突・成長する際には、(a)脱ガスによる水蒸気大気形成、(b)その大気の温室効果によるマグマオーシャン形成、(c)マグマオーシャンへの水の融解と温室効果の低減、という過程を経て、水は原始惑星まで受け継がれる。また、水をもつ原始惑星の巨大衝突による惑星形成の際にも、やはり水は残りうる。したがって、微惑星形成時に地球軌道付近で水が凝縮した場合(雪線が地球より内側)、地球型惑星は最初から水をもっていたと考えられる。しかし、雪線の位置は、原始太陽系星雲の光学的特性に大きく依存するために不確定である。

### 仮説[2]: 原始惑星-星雲ガスの酸化還元反応

星雲ガスの主成分は水素とヘリウムであるため、星雲ガス存在下で惑星表層がマグマで覆われた場合、マグマ中の酸化物と水素ガスの間で酸化還元反応が進み、水が生成される。しかし、マグマオーシャンを長時間保持できる大きな惑星(地球質量の>3割)が形成されるまで、十分な星雲ガスが残っていたかは、観測的にも理論的にも確定していない。

### 仮説[3]: レイトベニヤ説

地球、月、及び火星は、未分化な隕石であるコンドライトに比べ、KやRbなどの揮発性元素に著しく乏しいことが知られている。この観測事実は、地球型惑星が形成段階において、揮発性の高い水を失ったことを暗示する(仮説[1]で述べたように、水が失われない可能性がある)。水が失われたはずという解釈に基づく、地球型惑星の水は、炭素質コンドライトや彗星など水に富む天体が、後から惑星に少量付加してもたらされたと考えられる。

## 2. 研究の目的

これら多岐にわたる仮説を検証するためには、惑星の形成・成長の諸段階における、水の振る舞いを理解することが鍵となる。惑星の形成・成長の諸段階は、様々な隕石によって記録されている。例えば、コンドライトのような始源的隕石はダストの生成～集積の初期段階を記録し、アングライトなどの玄武岩質隕石は化学的に分化した初期原始惑星の情報を、火星起源の隕石は末期原始惑星～初期の地球型惑星の情報を提供する。これまでの研究で、始源的隕石が水に富んでいること、また、末期原始惑星(火星)・地球型惑星もある程度の水を保持していることは既に分かっている。しかし、その間にあたる分化した微惑星と初期原始惑星の含水量については良く分かっていない。原始惑星における水の情報は、惑星の形成・成長過程における水の挙動を理解する上で必要不可欠である。そこで本研究では、原始惑星の含水量と水の性質を追究する。

## 3. 研究の方法

微惑星の分化過程や集積成長過程における揮発性元素の挙動を探るため、本研究では微惑星や初期原始惑星に起源をもつと考えられる隕石試料について含水量や揮発性元素の含有量を推定し、惑星の形成・成長過程における水及び揮発性元素の挙動に制約を与えるため、以下の包括的な同位体地球年代学・化学を石質・石鉄質隕石に適用した。

[1] ウラン-鉛、ニオブ-ジルコニウム、アルミニウム-マグネシウム壊変系列を用いて、石質・石鉄隕石試料の年代を決定する。

[2] 石質・石鉄隕石試料の微量元素(水を含む)濃度分析に基づいて、隕石母天体における揮発性元素の枯渇度を推定する。

[3] アパタイトなどのリン酸塩カルシウム鉱物について、水素の定量分析及び同位体分析を実施し、隕石母天体の水の性質に制約を与える。

## 4. 研究成果

惑星進化の諸段階過程を探る研究対象として、以下の隕石試料について分析を進めた。分化が殆ど進んでいない微惑星に起源をもつ隕石として、始源的エコンドライト NWA6704、分化の進んだ微惑星に起源をもつ隕石として、D'Orbigny, Ibitira, NWA7325、小惑星ベスタに起源をもつユークライト隕石 Agoult, DAG-380, Camel Donga, NWA 049。これらの隕石試料のいくつかについて新たに年代測定及び鉱物学・地球化学を実施した。以下に Ibitira, Agoult, NWA6704 の結果について詳細に示す。

Ibitira 隕石は、気泡をもつ非常に稀な隕石であり、その気泡の存在から親マグマは揮発性成分を含んでいたと考えられる。この隕石中の輝石、斜長石、リン酸塩鉱物について年

代分析を行った結果、この隕石の形成年代は45.57億年前であることが明らかになった。さらに、Pbの含有量が他の中揮発性元素に比べて高いことから、親マグマから流体が離脱し、その流体に他の中揮発性元素が分配されたことを示した。これらの結果は、遅くとも45.57億年前にはIbitira隕石の母天体に揮発性元素が存在していたことを示す(Iizuka et al., 2014 *Geochimica et Cosmochimica Acta*)。

小惑星ベスタに起源をもつAgoult隕石は、高温変成作用を被った玄武岩質隕石であり、その輝石、斜長石、ジルコンについて年代測定を行った。その結果、この隕石の高温の変成作用の時期は45.55億年前であったことが明らかになった。さらに、ジルコンの微量元素組成から、この変成作用時の酸素フガシティーを推定し、この変成作用時には酸化剤となりうる水は存在しなかったであろうことを示唆した(Iizuka et al., 2015 *Earth and Planetary Science Letters*)。

分化の進んでいない微惑星に起源をもつと考えられるprimitive achondrite NWA 6704は、原始惑星の最初期進化についての情報を与える。この隕石には、流体包有物と思われる包有物が存在することがわかった。また、主要鉱物の化学組成からこの隕石が経験した温度圧力履歴を調べた結果、この隕石の形成にはインパクトイベントが関わっていた可能性を示した(Hibiya et al., in preparation)。

上記の結果に加えて、NWA7325の結晶化年代は太陽系形成から約400万年後であること、また、Agoult以外のユークライト隕石は太陽系形成から約1000万年~1億年の幅広い年代を示すことが分かった。これらの年代測定の研究成果は国内国際学会において発表され、さらに国際学術雑誌において発表された(Koefoed et al., 2016 *Geochimica et Cosmochimica Acta*)。

気泡を含む隕石であるD'OrbignyとIbitiraについては、その母天体に水が存在していた可能性が示唆されている。そこで、これらの隕石試料について他の揮発性元素の枯渇度をウラン/鉛比などを用いて検証した。その結果、これらの隕石母天体がもつ鉛やルビジウムなどの揮発性元素の相対濃度は、地球と同程度であることを示した。このことは、地球と同程度の揮発性元素の枯渇度を示す微惑星~原始惑星でも水を保持していた可能性を示し、レイトベニヤによって地球に水をもたらす必要がないことを示唆する(飯塚, 2016 *地球化学*)。さらに、これまでにレイトベニヤ仮説の根拠となっていた、地球マンテルの強親鉄性元素の過剰は、超巨大衝突によって生成された衝突破片の集積によって説明できることを明らかにした(Genda et al., 2017 *Earth and Planetary Science Letters*)。

D'Orbigny及びユークライト隕石に含まれるリン酸塩鉱物について水素同位体分析を行った結果、D'Orbigny隕石については火星隕石と同様に地球よりも重い水素同位体組

成を示すのに対し、ユークライト隕石の水素同位体組成は地球や炭素質コンドライトの水素同位体組成と誤差範囲内で一致することが明らかになった。この結果は、ユークライトの母天体ベスタと地球は同一の水の起源を有する可能性を示唆する。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① Genda H., Iizuka T., Sasaki T., Ueno Y. & Ikoma M. (2017) Ejection of iron-bearing giant-impact fragments and the dynamical and geochemical influence of the fragment re-accretion. *Earth and Planetary Science Letters* v. 470, 87–95 (doi.org/10.1016/j.epsl.2017.04.035) 査読有り。
- ② Iizuka T., Lai Y.-J., Akram W., Amelin Y. & Schönbachler M. (2016) The initial abundance and distribution of <sup>92</sup>Nb in the Solar System. *Earth and Planetary Science Letters* v. 439, 172–181 (doi.org/10.1016/j.epsl.2016.02.005) 査読有り。
- ③ Koefoed P., Amelin Y., Yin Q.-Z., Wimpenny J., Sanborn M., Iizuka T. & Irving A.J. (2016) U–Pb and Al–Mg systematics of the ungrouped achondrite Northwest Africa 7325. *Geochimica et Cosmochimica Acta* v. 183, 31–45 (doi.org/10.1016/j.gca.2016.03.028) 査読有り。
- ④ 飯塚 毅 (2016) 地球における海洋と大陸の形成. *地球化学* v. 50, 121–133 (doi:10.14934/chikyukagaku.50.121) 査読有り。
- ⑤ Iizuka T., Yamaguchi T., Hibiya Y. & Amelin Y. (2015b) Meteorite zircon constraints on the bulk Lu–Hf isotope composition and early differentiation of the Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* v. 112 (17), 5331–5336 (doi/10.1073/pnas.1501658112) 査読有り。
- ⑥ Iizuka T., Yamaguchi A., Haba M.K., Amelin Y., Holden P., Zink S., Huyskens M.H. & Ireland T.R. (2015a) Timing of global crustal metamorphism on Vesta as revealed by high-precision U–Pb dating and trace element chemistry of eucrite zircon. *Earth and Planetary Science Letters* v. 409, 182–192 (doi.org/10.1016/j.epsl.2014.10.055) 査読有り。
- ⑦ Iizuka T., Amelin Y., Kaltenbach A., Koefoed P., Stirling C.H. (2014) U–Pb systematics of the unique achondrite Ibitira: Precise age determination and petrogenetic implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta* v. 132, 259–273 (doi.org/10.1016/j.gca.2014.02.017) 査読有り。

[学会発表] (計 17 件)

- ① Hibiya Y., Archer G.J., Tanaka R., Iizuka T., Ozawa K., Walker R.J., Yamaguchi A. & Irving A.J. The origin and formation process of Northwest Africa 6704 primitive achondrite. *48<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference*. 2017年3月23日 ヒューストン (アメリカ).
- ② Hayakawa A., Fukuda K., Iizuka T. & Hiyagon H. High precision magnesium isotopic measurements for CV chondrite CAIs and LL3.15 chondrite chondrules. *48<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference*. 2017年3月21日 ヒューストン (アメリカ).
- ③ Mikouchi T., Yamaguchi A., Debaille V., McKibbin S., Goderie S., Pittarello L., Shirai N., Hublet G., Quitte G., Iizuka T., Greenwood R. & Claeys P. Mineralogy of olivine xenocrysts in Asuka 12209 angrite. *48<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference*. 2017年3月23日 ヒューストン (アメリカ).
- ④ 飯塚 毅, 山口 亮, コエフォエド ピアース, アメリン ユーリー, 日比谷 由紀. ユークライトのウラン-鉛年代学とベスタの熱史. 日本地球化学会年会 2016年9月16日 大阪市立大学 (大阪府, 大阪市)
- ⑤ Koike M., Iizuka T., Takahata N., Sano Y. & Haba M.K. Water in the early differentiated asteroids: Insights from apatite in basaltic eucrites. *79<sup>th</sup> Annual Meeting of the Meteoritical Society*. 2016年8月8日 ベルリン (ドイツ).
- ⑥ Iizuka T., Yamaguchi A., Koefoed P., Hibiya Y. & Amelin Y. U-Pb systematics of eudrites: a record of the thermal history. *26<sup>th</sup> Goldschmidt Conference*. 2016年6月28日 パシフィコ横浜 (神奈川県, 横浜).
- ⑦ Amelin Y., Yin Q.-Z., Koefoed P., Merle R., Huyskens M.H. & Iizuka T. Fractionation of radiogenic Pb isotopes induced by acid leaching: a pervasive phenomenon in Pb-isotopic dating of meteorites. *26<sup>th</sup> Goldschmidt Conference*. 2016年6月28日 パシフィコ横浜 (神奈川県, 横浜).
- ⑧ McKibbin S., Hecht L., Iizuka T. & Claeys P.H. Chromite: accessory tracers of pallasite parent body differentiation. *26<sup>th</sup> Goldschmidt Conference*. 2016年6月28日 パシフィコ横浜 (神奈川県, 横浜).
- ⑨ Hibiya Y., Iizuka T., Ozawa K. & Yamaguchi A. The origin of primitive achondrites inferred from a mineralogical and  $^{54}\text{Cr}$ - $^{50}\text{Ti}$  isotope study of NWA 6704. *26<sup>th</sup> Goldschmidt Conference*. 2016年6月28日 パシフィコ横浜 (神奈川県, 横浜).
- ⑩ 飯塚 毅, ライ イーゲン, アクラム ワヒード, アメリン ユーリー, ショーンバクラ マリア. 初期太陽系におけるニオ

ブ-92 の存在量と分布. 2016年5月24日 幕張メッセ (千葉県, 千葉市).

- ⑪ 日比谷 由紀, 飯塚 毅, 小澤 一仁, 山口 亮. 始原的エコンドライトの起源解明に向けた NWA6704 の鉱物学的及び同位体宇宙化学的研究. 2016年5月24日 幕張メッセ (千葉県, 千葉市).
- ⑫ Iizuka T., Yamaguchi T., Hibiya Y. & Amelin Y. The solar initial abundance of hafnium-176 revealed by eucrite zircon. *46<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference*. 2015年3月17日 ヒューストン (アメリカ).
- ⑬ Iizuka T., Yamaguchi A., Haba M.K., Amelin Y., Holden P., Zink S., Huyskens M.H. & Ireland T.R. Thermal history of Vesta's crust constrained by U-Pb dating and trace element chemistry of zircon in the Agouti eucrite. *The 37<sup>th</sup> Symposium on Antarctic Meteorites*. 2014年12月3日 国立国語研究所 (東京都, 立川市).
- ⑭ 久岡 由実, 飯塚 毅, 高畑 直人, 小澤 一仁, 永原 裕子, 佐野 有司. マグマ固化過程の揮発性成分挙動の指標としてのアパタイト: 納沙布岬貫入岩体への適用とその有用性. *日本地質学会*. 2013年9月14日 東北大学 (宮城県, 仙台市).
- ⑮ 飯塚 毅. 初期太陽系年代学の統一的理解に向けて. 日本地球化学会年会 2013年9月13日 茨城大学 (茨城県, 水戸市)
- ⑯ 久岡 由実, 飯塚 毅, 高畑 直人, 小澤 一仁, 永原 裕子, 佐野 有司. マグマ固結過程の指標としての apatite の有用性: 納沙布岬貫入岩体を例にして. *地球惑星科学連合大会*. 2013年5月20日 幕張メッセ (千葉県, 千葉市).
- ⑰ 飯塚 毅, アメリン ユーリー, 山口 亮, 高木 康成, 野口 高明, 木村 眞. Northwest Africa 6704 のウラン-鉛年代学. *地球惑星科学連合大会*. 2013年5月20日 幕張メッセ (千葉県, 千葉市).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:

権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

飯塚 毅 (IIZUKA, Tsuyoshi)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号：70614569

##### (2)研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3)連携研究者

( )

研究者番号：

##### (4)研究協力者

小澤 一仁 (OZAWA, Kazuhito)  
佐野 有司 (SANO, Yuji)  
三河内 岳 (MIKOUCHI, Takashi)  
中井 俊一 (NAKAI, Shun'ichi)