

小惑星リュウグウの母天体中に氷が 10 億年以上にわたり存在

飯塚 毅
Iizuka Tsuyoshi

1. はじめに

探査機「はやぶさ2」は、小惑星リュウグウにおいて観測や人工衝突クレーター生成実験を行い、2回のタッチダウンで採取した5.4 gの試料を2020年12月に地球へ持ち帰った。小惑星は、惑星の材料となった始原的な天体の生き残りで、その多くは小惑星帯に存在する。その中でも太陽から離れた場所には炭素を主成分とする小惑星が多く分布し、始原的な炭素質小惑星は地球型惑星に水や有機物を供給したと考えられている。リュウグウは、地球と火星軌道の間を公転する炭素質小惑星であり、「はやぶさ2」ミッションの科学的目的は、太陽系の起源と進化、地球の水と生命の原材料物質を調べることである。

「はやぶさ2」のその場観測や帰還試料の分析により、リュウグウとその元となった天体（母天体）について、様々なことが分かってきた。本稿では、リュウグウ試料のルテチウム-ハフニウム（Lu-Hf）同位体年代から、炭素質小惑星の水の行方に迫った研究¹⁾を解説する。

2. リュウグウからわかってきたこと

リュウグウ試料のLu-Hf同位体年代学の解説に先立ち、その背景となるリュウグウの先行研究の結果をまとめておきたい。なお、先行研究の詳細については本誌²⁻⁵⁾や日本惑星科学会誌⁶⁻⁸⁾等の解説記事を参照されたい。

リュウグウは、様々なサイズの岩塊や岩片からな

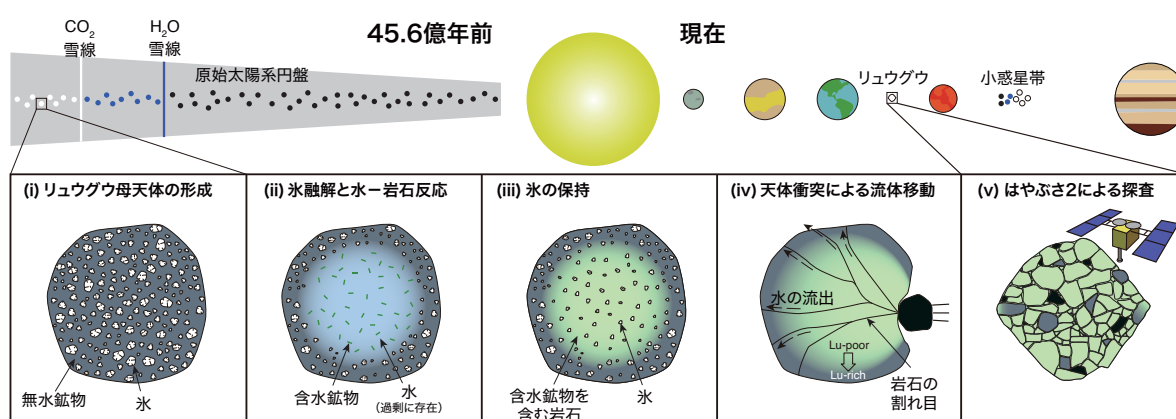


図1 小惑星リュウグウとその母天体の歴史

(i) リュウグウの母天体は、今から45.6億年前に、原始太陽系円盤の外側で、氷、有機物、鉱物の塵が集積し誕生した。(ii) 母天体形成から数百万年後に、短寿命放射性核種の崩壊熱で氷が融け、水質変成により含水鉱物が形成された。(iii) やがて、崩壊熱が小さくなり、水質変成時に過剰に存在した氷が凍った。(iv) 母天体形成から10億年以上後に、天体衝突により氷が融けると共に、水の通り道となる岩石の割れ目が形成され、Luが氷と共に流出した。(v) 天体衝突で破壊された母天体の一部が再集積しリュウグウが形成され、今から約500万年前に現在の近地球軌道に移動した。探査機「はやぶさ2」は、リュウグウの表層物質と地下物質を回収した。

る直径約 900 m の瓦礫天体で、天体衝突により破壊された母天体の破片の一部が再集積して形成された(図 1)。リュウグウが現在の近地球軌道に移動してきたのは、今から約 500 万年前のことである。リュウグウ試料は、炭素質隕石、特に CI コンドライトと鉱物学的、化学的に似ている。CI コンドライトは、イブナ隕石に代表される総数約 10 個の隕石群で、最も激しい水質変成を受けているにもかかわらず、その化学組成は太陽の光球に最も近く始原的である。リュウグウの母天体及び CI コンドライトの母天体は、原始太陽系円盤の H₂O と CO₂ の雪線の外側で、氷、有機物、鉱物の塵が集積し誕生した。その数百万年後、短寿命放射性核種の崩壊熱により氷が溶け、二酸化炭素を含む水が岩石と反応し、水酸基を含む層状ケイ酸塩鉱物や炭酸塩鉱物等の二次鉱物がつくられた。二次鉱物の組み合わせは、この水質変成が水に飽和(含水鉱物形成後も過剰な水が存在)した状態で進んだことを示す。

リュウグウ試料と CI コンドライトの間には、違いも見られる。その 1 つは、リュウグウ試料では、層状ケイ酸塩鉱物の層間に含まれる分子水の量が極端に少なく、ほぼすべての水が結晶構造中の水酸基として存在する点である。この違いは、CI コンドライトの層状ケイ酸塩鉱物の層間に地球の分子水が吸着したことが原因と考えられる。よって、リュウグウ試料は、炭素質小惑星の水について、より初生的な情報を与えてくれる。

これら先行研究の結果から、1 つの疑問が生じる。それは、「太陽系初期の水質変成の際に存在した過剰な分子水は、リュウグウ試料からいつ、どのように失われたか？」である。この問いに答える手掛かりが、リュウグウ試料から得られた異常な Lu-Hf 年代にあった。

3. リュウグウ試料の異常な Lu-Hf 年代

放射性同位体 ¹⁷⁶Lu は、半減期 372 億年で安定同位体 ¹⁷⁷Hf へと β 崩壊する⁹⁾。Lu-Hf 系は、マグマ活動や岩石の変成作用等、Lu と Hf の元素分別を伴う地質学的な事象が起きた年代を計測する時計として利用される。具体的には、試料の Lu-Hf 同位体と年代 *t* の間に、以下の式が成り立つ。

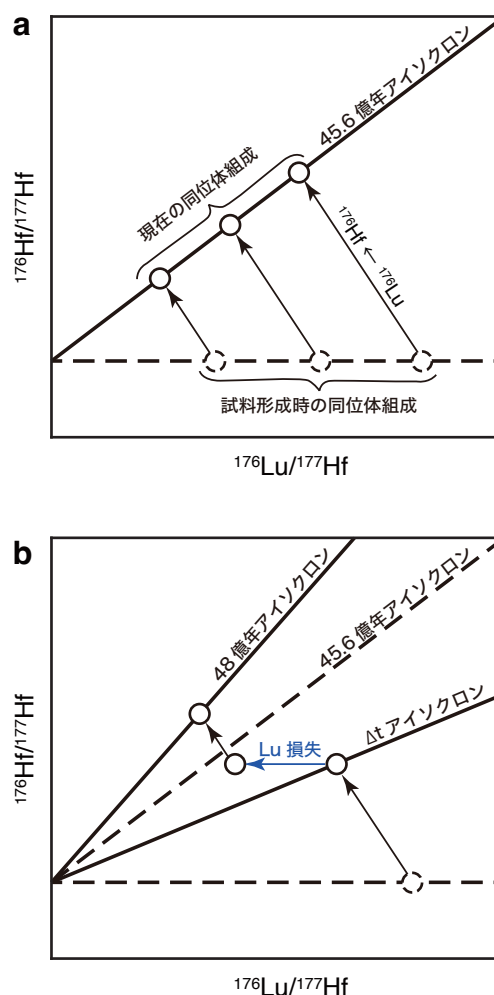


図 2 Lu-Hf 年代測定法の原理

(a) 今から 45.6 億年前に形成された複数試料が定義するアイソクロンの模式図。(b) 二次的な Lu 損失が Lu-Hf 年代に及ぼす影響の模式図。今から 45.6 億年前に形成された試料が、形成から Δ*t* 経って Lu を部分的に損失し、現在の同位体組成が 48 億年アイソクロン上にプロットされる例

$$\left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}\right)_p = \left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}\right)_0 + \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}\right)_p (e^{\lambda t} - 1) \quad (1)$$

ここで、λ は ¹⁷⁶Lu の壊変定数で、下付きの *p* と 0 はそれぞれ試料の現在と形成時における同位体比を表し、¹⁷⁷Hf は非放射性起源の安定同位体である。同じ年代 *t* と (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)₀ を持つ複数の試料について、測定した (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{*p*} と (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{*p*} をプロットすると一直線上に並ぶ。この直線はアイソクロン(等時線)と呼ばれ、その傾きから年代 *t* を決定できる(図 2a)。

筆者らは、リュウグウ試料の初期分析の一環として、Lu-Hf 同位体を分析した。分析試料は、「はやぶさ 2」の 1 回目のタッチダウンで採取されたリュ

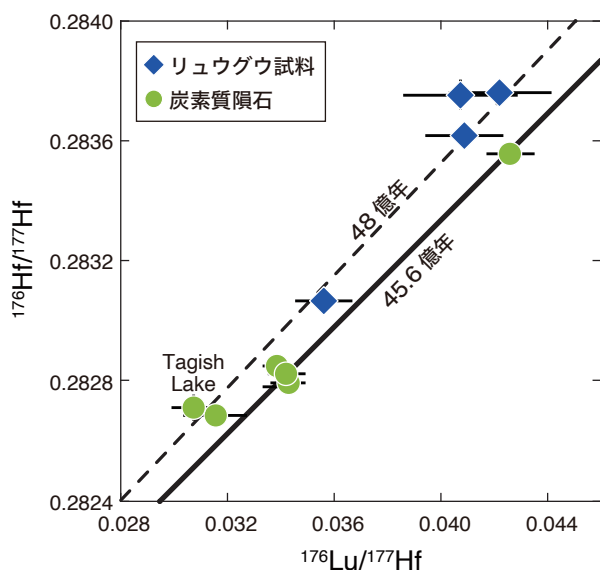


図3 リュウグウ試料と炭素質隕石のLu-Hf 同位体組成
実線と破線は、それぞれ45.6億年と48億年のアイソクロン。どちらも縦軸の切片(式(1)の右辺第一項)に、太陽系の初生 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ を仮定している

ウグウ表層試料2つと、人工クレーター付近における2回目のタッチダウンで採取されたリュウグウの地下物質を含む試料2つである。各試料について、粒径1 mm以下の砂の集合体約20 mgを酸で溶液化した後、樹脂を用いてLuとHfを分離し、その同位体組成を誘導結合プラズマ質量分析計で測定した。

リュウグウ試料のLu-Hf同位体分析結果(図3)は、筆者の予想とは大きく異なるものであった。というのも、リュウグウ試料の結果が、太陽系の年齢45.6億年よりも古い48億年アイソクロン上にプロットされたのである。リュウグウ試料と同時に6つの炭素質隕石を同程度の試料量(約20 mg)で分析したところ、2つのCIコンドライトを含む5つの炭素質隕石は45.6億年アイソクロン上にプロットされた。これに対し、Tagish Lake隕石はリュウグウ試料と同様に48億年アイソクロン上にプロットされた。リュウグウ試料は、他の放射壊変系でも年代測定されているが、レニウム-オスミウム(Re-Os)年代が<20億年前と明瞭に若いのを除き¹⁰⁾、すべて約45.6億年前である。これらの結果から、リュウグウ試料及びTagish Lake隕石では、Lu-Hf時計が“狂った”ことが明らかになった。

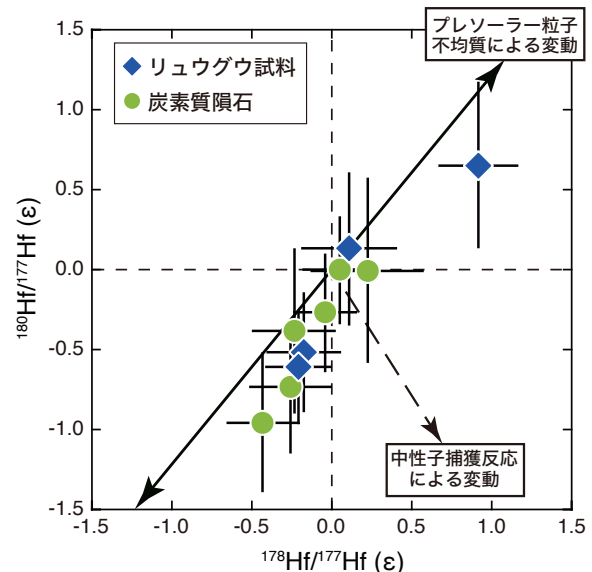


図4 リュウグウ試料と炭素質隕石の非放射性起源のHf同位体組成

同位体組成は、地球標準物質からの1万分偏差($1\epsilon = 0.01\%$)で表されている。破線及び実線矢印は、それぞれ二次的な中性子捕獲反応とプレソーラー粒子の不均質分布があった際に予測される変動

4. 狂った時計は若い流体活動の証拠

なぜ、Lu-Hf時計は狂ってしまったのだろうか？その理由として、以下の4つの可能性が考えられる。1) ^{176}Lu 放射性崩壊の加速、2) 中性子捕獲反応、3) プレソーラー粒子の不均質性、4) Lu-Hf系の二次的な擾乱。

^{176}Lu には、半減期3.7時間で ^{176}Hf に崩壊する核異性体が存在する。したがって、試料への高エネルギーγ線の照射等により ^{176}Lu が励起されると、 ^{176}Lu 放射性崩壊が加速しうる。この崩壊加速が起きた場合には、試料中の ^{176}Lu が安定同位体 ^{175}Lu に対して欠乏するはずである。そこで、リュウグウ試料の $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}$ を測定したが、 ^{176}Lu 欠乏は見られず、この可能性は棄却された。

大気のない小惑星の表層では、宇宙線照射により生成される中性子の捕獲反応が進む。この二次的な中性子捕獲反応は、同位体毎に起こりやすさが異なるために $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ を上昇させ、見かけ上古いLu-Hf年代をもたらしうる。ただし、この場合には $^{178}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ の上昇と $^{180}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ の減少を伴う。リュウグウ試料とTagish Lake隕石の $^{178}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ と $^{180}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ は変動していたが、2つの同位体比の変動は負の相関ではなく正の相関を示すことから

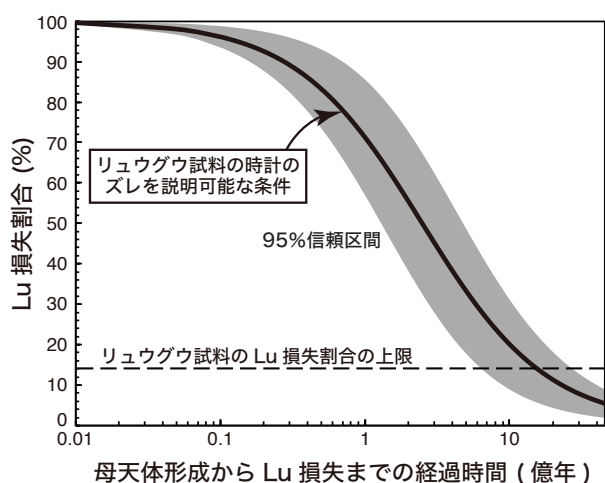


図5 リュウグウ試料のLu-Hf時計のズレを説明するLu損失の時期と割合

(図4), 中性子捕獲反応の影響はないことが分かった。

$^{178}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ と $^{180}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ の正相関は、宇宙における元素合成過程の1つである s 過程でつくられたHfを含むプレソーラー粒子が、試料中に異なる割合で存在したことで説明できる。プレソーラー粒子の不均質性は、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ の変動を伴い、Lu-Hf時計を狂わせる。この影響を、既知のプレソーラー粒子Hf同位体組成に基づいて補正すると、リュウグウ2試料とTagish Lake隕石のLu-Hf年代は更になくなった。

試料形成後に二次的にLu/Hfが減少すると、そのLu-Hf年代は見かけ上古くなる(図2b)。いくつかの非炭素質隕石もまた太陽系よりも古いLu-Hf年代を示し、その原因は隕石母天体での高温(> 600°C)熱変成時のLu拡散、もしくは地球上の流体を介したLu流出とされている。これに対し、リュウグウ試料はごく一部の粒子を除き、Luが拡散する温度はおろか、分子水が完全に失われる温度(> 100°C)すら経験しておらず、地球で自然の流体と触れていない。したがって、リュウグウ試料の古いLu-Hf年代は、小惑星リュウグウもしくはその母天体での流体活動によりLuが失われた証拠と捉えられる。Tagish Lake隕石の年代異常も、流体を介したLu損失が原因と考えられるが、同隕石はその名の湖に落下しており、地球の水が寄与した可能性がある。

Lu-Hf時計の狂いがLu損失に因る場合、時計の

ズレ具合からLu損失の時期を制約できる。Lu損失の時期が遅いほど、またその損失割合が大きいほど、45.6億年アイソクロンからのズレは大きくなる(図2b)。一方、Lu損失割合の上限は、リュウグウ試料が元々CIコンドライトと同じLu濃度をもってたと仮定すれば求められる。つまり、リュウグウ試料の現Lu濃度と、同量(約20 mg)のCIコンドライトのLu濃度の95%信頼区間上限値との差分が、Lu損失量上限に相当する。この方法により、45.6億年前にリュウグウ母天体が形成されてから少なくとも10億年経過した後に、Lu損失が起きたことが分かった(図5)。

5. 炭素質小惑星の水の行方

リュウグウ試料からLuを持ち去った流体の起源について考えてみよう。候補として、太陽系初期の水質変成で作られた含水鉱物の水酸基と、その際に過剰に存在した分子水がある。前者を液体の水に戻すには、約400°Cまで温度を上げる必要があるが、リュウグウ試料はそのような高温を経験していない。一方、小惑星は惑星に比べて遥かに早く冷えるため、リュウグウ母天体の形成から数千万年以内には、分子水は凍結したであろう。この水を10億年以上経ってから溶かす機構としては、リュウグウ母天体を破壊したような天体衝突と、リュウグウが近日点付近で受けた太陽の放射が考えられる。しかし、太陽放射による加熱が有効なのは小惑星の表層ごく一部であり、「はやぶさ2」の2回のタッチダウンで回収された表層物質と地下物質の両方にLu-Hf時計の狂いが見られたことと矛盾する。また、天体衝突説は、分子水が太陽系初期の水質変成時にはリュウグウ母天体中に留まり、10億年以上経ってから流出したことを良く説明する。リュウグウ試料やCIコンドライトの様に細粒な鉱物から成る岩石は流体が透りづらいため、天体衝突で岩石に亀裂ができて初めて水の通り道ができたと考えられるためである。これらのことから、リュウグウ母天体は分子水を氷として10億年以上にわたって保持し、天体衝突が起きた際にこの氷が溶けて水が流出したと結論づけられた(図1)。

地球の水の起源に関する多くの研究では、炭素質小惑星が水を含水鉱物の水酸基として地球に供給し

たと想定されていた。つまり、CI コンドライトにはリュウグウ試料とは異なり、層状ケイ酸塩の層間に多くの分子水が存在するが、それらは地球の水による汚染由来であることを、リュウグウ試料が持ち帰られる前から暗に認めていたのである。これに対し、リュウグウ試料の Lu-Hf 同位体年代学の結果は、地球型惑星の材料となった炭素質小惑星が含水鉱物の水酸基に加え、分子水を保持していたことを示唆する。この場合、炭素質小惑星の貯える水の総量は 20~30 重量%と見積もられる。この量は、従来の想定量の 2~3 倍に相当し、皮肉なことに地球の水に最も汚染された CI コンドライトの含水総量と一致する。

6. 今後の展望

本稿で解説した研究は、地球の水に汚染されていない探査帰還試料により可能となったものである。2023 年 9 月には、探査機オサイリス・レックスが炭素質小惑星ベンヌから 121.6 g の試料を帰還した。ベンヌ試料の Lu-Hf 同位体分析は、リュウグウ試料の水の歴史の一般性の評価を可能とする。また、リュウグウ及びベンヌ試料に、水から沈殿した塩⁵⁾が見つかり、この塩の分析は炭素質小惑星の水について新たな知見をもたらさう。

炭素質小惑星の貯水量の改定は、地球科学にも影響を及ぼす。最近の研究では、地球の材料物質全体の 6 重量%がリュウグウのような炭素質小惑星であったと推定されている。この推定値と改定後の貯

水量から、地球全体の 1.2~1.8 重量%の水が供給されたと概算される。これは地球海洋質量の 60~90 倍に相当する。そこで問題となるのは、地球にもたらされた大量の水の行方である。地球の形成・初期分化時にどのぐらいの水が宇宙空間に放出され、地球内部では水がどのように分配されたのか、地球史を通してどのぐらいの水が地球から散逸したのか、現在の地球マントルや核にどのぐらい水が含まれているのか、今後の研究が楽しみである。

謝辞

本稿で解説した研究を可能なものとしてくださった「はやぶさ 2」プロジェクトチームの方々、参画メーカーの方々、コアメンバーの方々、初期化学分析チームの方々、渋谷岳造博士、早川岳人博士、伊藤健吾博士、山口亮博士に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Iizuka, T., *et al.*, *Nature*, **646**, 62-67 (2025)
- 2) 横山 哲也, *Isotope News*, **786**, 17-21 (2023)
- 3) 岡崎 隆司, *Isotope News*, **788**, 13-17 (2023)
- 4) 奈良岡 浩, *Isotope News*, **790**, 24-28 (2023)
- 5) 松本 徹, *Isotope News*, **801**, 27-30 (2025)
- 6) 矢田 達, 他, 日本惑星科学会誌, **31**, 153-164 (2022)
- 7) 塚本 尚義, 他, 日本惑星科学会誌, **31**, 286-297 (2022)
- 8) 中村 智樹, 他, 日本惑星科学会誌, **32**, 226-235 (2023)
- 9) 早川 岳人, 他, *Isotope News*, **795**, 2-5 (2024)
- 10) Nakamura, E., *et al.*, *Proc. Japan Acad. Ser. B*, **98**, 227-282 (2022)

(東京大学大学院理学系研究科)