

初期太陽系における微惑星の形成年代の推定

Formation age of planetesimal in the early solar system

(日本地球化学会推薦)

代表研究者 北海道大学 川崎 教行 Hokkaido University Noriyuki KAWASAKI

Determining the formation age of planetesimals is crucial for understanding the evolution of the early solar system. We performed Mn-Cr and Al-Mg isotope systematics of minerals in the asteroidal materials sampled from the C-type asteroid Ryugu by the JAXA Hayabusa2 spacecraft to constrain the formation age of the parent planetesimal of Ryugu. We developed a multi-collection system for the secondary ion mass spectrometer that simultaneously counts the secondary ions of $^{52}\text{Cr}^+$, $^{53}\text{Cr}^+$, and $^{55}\text{Mn}^+$ to obtain high-precision Mn-Cr ages of the carbonate mineral, dolomite, in the Ryugu sample. The measured Mn-Cr isotopic compositions for dolomite in the Ryugu first touchdown sample clearly show isochronous correlation between $^{55}\text{Mn}/^{52}\text{Cr}$ and radiogenic ^{53}Cr . The mineral isochron gives an initial $^{53}\text{Mn}/^{55}\text{Mn}$ of $(2.55 \pm 0.35) \times 10^{-6}$, corresponding to a relative age of 5.2 ± 0.8 Myr after the formation of the first solids in the solar system and an absolute age of ~ 4.562 Gyr. Furthermore, we found that dolomite grains in the Ryugu second touchdown sample have a different initial $^{53}\text{Mn}/^{55}\text{Mn}$ than those in the first touchdown sample, of $(3.78 \pm 0.34) \times 10^{-6}$. A relative age between the dolomites in the first and second touchdown samples is 2.1 ± 0.9 Myr. Thermal modeling of the planetesimal would be required to constrain the detailed accretion age of the parent planetesimal of Ryugu.

研究目的

太陽系の惑星の色や大きさはそれぞれ異なり、地球には生命が存在する。太陽系の多様な惑星がいつ・どのようにして作られたのかは、地球惑星科学における根源的課題であり、我々が住む地球や生命の起源を解明する鍵となる。惑星形成理論によれば、太陽系の前身である原始太陽系円盤に存在した固体物質とガスが材料となり、惑星が誕生した。天文観測により、太陽系以外の星やその周りの円盤、そして惑星が誕生する様子を観察することができるが、現在の技術をもってしてもその全貌は明かされていない。つまり、原始太陽系円盤から現在の惑星への進化過程には未だ多くの謎が残されている。

本研究の目的は、初期太陽系において形成した「微惑星」の形成時期を明らかにすることである。微惑星は、約46億年前の初期太陽系で、 H_2O 氷をはじめとした固体物質が集積して形成した天体で、惑星の前身である。その形成時期の解明は、原始太陽系円盤から惑星への進化過程を探る大きな手がかり

となる。微惑星内においては、集積した H_2O 氷が溶けて水が発生し、鉱物・有機物間の元素の移動を引き起こしていたとされる。本研究では、そのような水溶液から晶出した、炭酸塩鉱物「ドロマイト」の形成年代を測定した。それにより、初期太陽系の微惑星において、水溶液が存在していた時期を直接的に明らかにした。それを鉱物の晶出温度および微惑星の熱進化モデルと照らし合わせることで、微惑星の形成時期を解明することができる。またそれに加えて、微惑星の材料物質の形成年代を測定した。微惑星の材料物質と微惑星の天体内部での水溶液からの鉱物晶出時期の両者を比較することで、微惑星の形成時期にさらなる制約を与えた。

研究経過・考察

1. 多重検出法による高精度 Mn-Cr 年代測定法開発

本研究の中核を担う微惑星の鉱物の形成年代測定を有意な精度で実施可能な分析手法は、現在のところ二次イオン質量分析法のみである。本研究ではま

ず微惑星物質の年代測定の準備として、二次イオン質量分析法における年代測定技術の向上を行った。

二次イオン質量分析法では、加速・収束させた一次イオンビームをサンプル表面に照射し、スパッタリングによりサンプルから放出された二次イオンを質量分析する。また、サンプルから放出された原子のうち二次イオンとして検出できたものの割合を二次イオン収率と呼ぶ。一次イオンビームのサンプルへの照射時間が長くなればなるほど、サンプル表面のチャージアップ（帯電）現象により、二次イオン収率が徐々に低下してしまう。そのため、二次イオンを多く計数することで統計誤差を小さくしようとしても、一定の精度で打ち止まってしまう。

また高精度化を妨げる要因が他にもある。微惑星の水溶液から晶出した鉱物の年代測定に用いる Mn-Cr 法では、 $^{52}\text{Cr}^+$ 、 $^{53}\text{Cr}^+$ 、 $^{55}\text{Mn}^+$ の二次イオンを検出し、その量比を見積もる必要がある。従来法においては、セクターマグネットの磁場を高速で何度も切り替えながら、単独の検出器でこの三種の二次イオンが繰り返し順番に測定されてきた (e.g., Doyle et al., 2015, *Nat. Commun.*)。しかしこの方法では、磁場を切り替えた後、安定するまでの間には二次イオンを検出できず、また当然、同時には一種の二次イオンしか検出できない。そのため、サンプルから放出され質量分離された二次イオンの大部分が検出器に入ることなく失われてしまう。つまり二次イオンの検出効率が非常に悪いのである。

一方で、異なる質量電荷比 (m/z) をもつ二次イオンを同時に検出する同時検出法による同位体分析が、特に宇宙・地球化学分野の高精度分析において用いられてきた (e.g., Kita et al., 2010, *GCA*; Kawasaki et al., 2015, *GCA*)。同時検出法においては、磁場の切り替えにより生じる検出ロスが一切なく、二次イオンの検出効率を最大化できる。それによりチャージアップにより二次イオン収率が低下する前に十分な量の二次イオンを計数できる。さらに濃度変化などによる二次イオン強度の変動をキャンセルできる。以上のアドバンテージから、同時検出法により高精度の元素・同位体比の分析が実現可能である。我々は、多重検出系を備えた二次イオン質量分析計 (Cameca ims-1280HR) を用いて、Mn-Cr 年代測定において必要な $^{52}\text{Cr}^+$ 、 $^{53}\text{Cr}^+$ 、 $^{55}\text{Mn}^+$ の二次イオンを三つの電子増倍管で同時検出することに成功した。それにより、 $^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$ 同位体比の分析誤差を従来の

数分の一に低減することができ、年代測定精度の高精度化に成功した。

2. 小惑星リュウグウの炭酸塩鉱物の形成年代測定

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の小惑星探査機「はやぶさ2」は、2020年にC型小惑星リュウグウの砂・岩石サンプルを地球に持ち帰ってきた。我々は、はやぶさ2初期分析プロジェクトにおいて、小惑星リュウグウのサンプルの化学分析を行った (e.g., Kawasaki et al., 2022, *Sci. Adv.*; Fujiya, Kawasaki et al., 2023, *Nat. Geosci.*; Yokoyama, Kawasaki et al., 2023, *Science*)。特に本研究において、リュウグウサンプルに含まれる炭酸塩鉱物「ドロマイト」の形成年代を測定した。図1は、リュウグウサンプルに含まれるドロマイトの反射電子像である。ドロマイトは磁鉄鉱やフィロケイ酸塩を粒子内に含むため、それらの鉱物を避けて Mn-Cr 同位体組成を測定する必要がある。そのため、二次イオン質量分析計の一次イオンビームを $5\ \mu\text{m}$ 径まで細く絞り、ドロマイト部に局所的に照射しての分析を行った。図2はドロマイトの Mn-Cr 同位体組成をプロットした Mn-Cr 進化図である。 $^{55}\text{Mn}/^{52}\text{Cr}$ 比 (横軸) に比例した ^{53}Mn 放射壊変起源の ^{53}Cr 量 (縦軸) の増加がみられる。 ^{53}Mn - ^{53}Cr アイソクロンを定義すると、ドロマイト形成時の初生 $^{53}\text{Mn}/^{55}\text{Mn}$ 比は $(2.55 \pm 0.35) \times 10^{-6}$ と見積もられる。この初生比から、小惑星リュウグウ中のドロマイトは、太陽系最古の岩石 CAI の形成から 520 ± 80 万年後に、母天体微惑星の水溶液から晶出し形成したことが明らかになった (Yokoyama, Kawasaki et al., 2023, *Science*)。絶対年代に換算すると約 45.62 億年前となる。

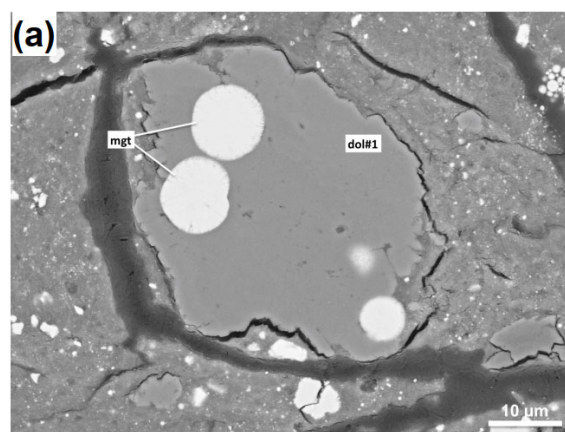


図1 Backscattered electron image of dolomite in the Ryugu sample.

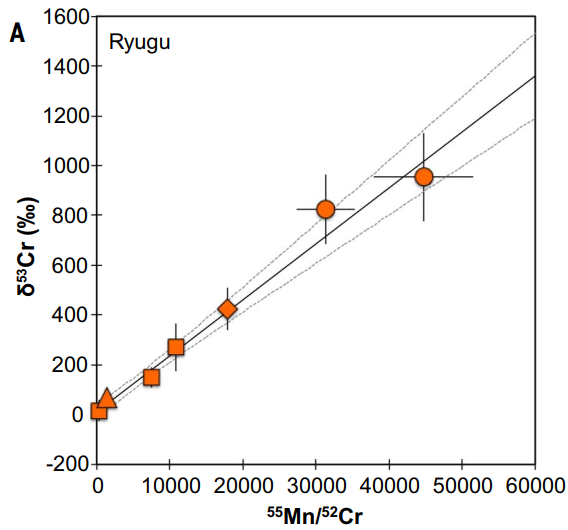


図 2 ^{53}Mn - ^{53}Cr isochron of dolomite in the Ryugu sample. Data are taken from Yokoyama et al. (2023).

3. 小惑星リュウグウの二つのサンプル採取サイト間における炭酸塩鉱物の形成年代差の発見

はやぶさ 2 探査機は小惑星リュウグウに二度のタッチダウンを行い、異なるサイトからそれぞれサンプルを採取した。図 2 のデータは一度目のタッチダウンサイトから採取したサンプル (A サンプル) のドロマイトを測定したものである。我々はさらに、二度目のタッチダウンサイトのサンプル (C サンプル) 中に含まれるドロマイトの Mn-Cr 同位体分析を行った。Mn-Cr 進化図上で、C サンプルのドロマイトデータは、A サンプルとは明らかに異なる傾きの線の上にプロットされる (図 3)。C サンプルのドロマイトの ^{53}Mn - ^{53}Cr アイソクロンを定義すると、初生 $^{53}\text{Mn}/^{55}\text{Mn}$ 比は $(3.78 \pm 0.34) \times 10^{-6}$ と見積もられる。両者は 210 ± 90 万年の形成年代差を示し、C サンプルのドロマイトは、A サンプルのものよりも約 200 万年前に形成したものであることが明らかになった。また C サンプルのドロマイトは、太陽系最古の岩石 CAI の形成から 310 ± 50 万年後に形成したものであることが明らかになった。絶対年代に換算すると約 45.64 億年前となる。

ドロマイトと磁鉄鉱の酸素同位体の質量依存分別に基づいた酸素同位体温度計より、A サンプルのドロマイトの晶出温度は $37 \pm 10^\circ\text{C}$ (Yokoyama, Kawasaki et al., 2023, *Science*), C サンプルは $92 \pm 21^\circ\text{C}$ であったと見積もられた。小惑星リュウグウの

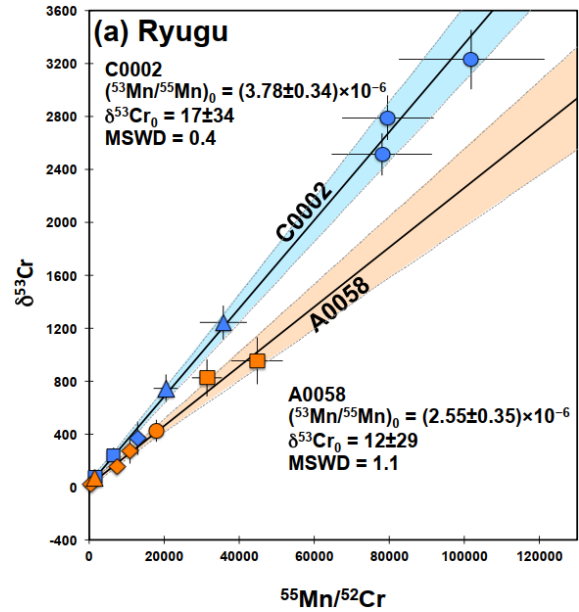


図 3 ^{53}Mn - ^{53}Cr isochrons of dolomite in the Ryugu C0002 sample and A0058 sample. Data of A0058 sample are taken from Yokoyama et al. (2023).

異なるサイトから採取された両サンプルは、母天体微惑星においても異なる領域に存在し、異なる温度履歴を辿ったものであることが示唆される。つまり、小惑星リュウグウの母天体微惑星において、一方の領域は約 45.64 億年前に約 90°C であり、他方の領域はその約 200 万年後に約 40°C であったと解釈できる。

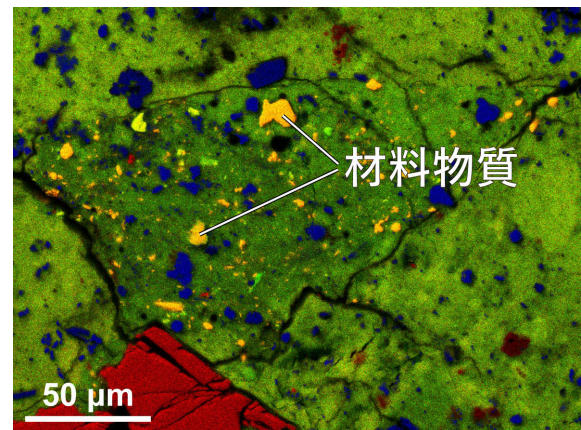


図 4 Combined elemental map using Mg K α , Si K α , and Fe K α assigned for RGB color channels, showing anhydrous primary minerals in Ryugu sample. Mineral grains seen as yellow are olivine, one of the primary minerals. Data are taken from Kawasaki et al. (2022).

今後の研究の展開として、この温度と時間の関係を満たす微惑星の熱進化モデルの構築が求められる。

4. 小惑星リュウグウの材料物質の形成年代

ここまでで、小惑星リュウグウの母天体微惑星の内部において水溶液から晶出した鉱物の形成年代について述べた。小惑星リュウグウを構成する鉱物のほとんどは、そのような水質変質プロセス中に形成したものである。一方で母天体微惑星における大規模な水質変質プロセスを生き残った、小惑星リュウグウの材料物質もわずかながら存在する（図 4; Kawasaki et al., 2022, *Sci. Adv.*）。小惑星リュウグウの母天体微惑星の形成時期は、その材料物質が原始太陽系円盤で形成した時期と、微惑星で水溶液から晶出したドロマイトの形成時期との間のはずである。そこで我々は、小惑星リュウグウ材料物質の年代測定を行った。

母天体微惑星の水質変質プロセスを生き残った材料物質として、これまでにかんらん石、輝石、スピネル、ヒボナイトといった鉱物がみついている。このうちスピネルとヒボナイトは Al と Mg を主要元素として含むため、Al-Mg 法による年代測定が可能である。我々は二次イオン質量分析計を用いて、スピネルとヒボナイトから成る包有物の Al-Mg 年代測定を行った（図 5）。 ^{26}Al - ^{26}Mg アイソクロンを定義すると初生 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比は約 4.4×10^{-5} と見積もられ、太陽系最古の岩石 CAI の形成から約 20 万年後に形成したものであることが明らかとなった。

以上の小惑星リュウグウの構成物の年代測定から、その母天体微惑星の形成時期は、太陽系最古の岩石

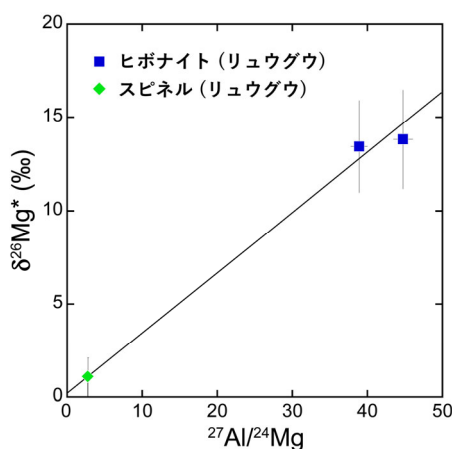


図 5 Al-Mg isotope compositions for hibonite and spinel in Ryugu sample. Unpublished data.

CAI の形成から約 20 万年後以降かつ約 300 万年後以前であることが明らかとなった。今後詳細な微惑星の熱進化モデルの構築により、精密な微惑星の形成時期が明らかになるだろう。

参考文献

1. Kita, N.T., Nagahara, H., Tachibana, S., Tomomura, S., Spicuzza, M.J., Fournelle, J.H. and Valley, J.W. (2010) High precision SIMS oxygen three isotope study of chondrules in LL3 chondrites: Role of ambient gas during chondrule formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 6610–6635.
2. Doyle, P.M., Jogo, K., Nagashima, K., Krot, A.N., Wakita, S., Ciesla, F.J. and Hutcheon, I.D. (2015) Early aqueous activity on the ordinary and carbonaceous chondrite parent bodies recorded by fayalite. *Nature Communications* 6, 7444.
3. Kawasaki, N., Kato, C., Itoh, S., Wakaki, S., Ito, M. and Yurimoto, H. (2015) ^{26}Al - ^{26}Mg chronology and oxygen isotope distributions of multiple melting for a Type C CAI from Allende. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 169, 99–114.

研究の発表

口頭発表

1. 川崎教行、坂本直哉、宮本悠史、馬上謙一、Barnes J., Connolly H. C., Lauretta D., 坂本尚義 (2024) 「Ivuna 隕石および Ryugu, Bennu サンプルに含まれる無水一次鉱物の起源」 日本地球惑星科学連合 2024 年大会.
2. Kawasaki N., Sakamoto N., Miyamoto Y., Bajo K., Barnes J., Connolly H. C., Lauretta D. and Yurimoto H. (2024) “Anhydrous primary minerals in Ryugu, Ivuna, and Bennu” Solar System symposium in Sapporo 2024.
3. 川崎教行、正立大騎、山本大貴、Steven B. Simon、坂本直哉、坂本尚義 (2023) 「CAI ファッサイトの酸素同位体組成変動の起源」 2023 年度 日本地球化学会 第 70 回年会.
4. Kawasaki N., Yamamoto D., Wada S., Park C., Kim H., Sakamoto N. and Yurimoto H. (2023) “Al-Mg chronology of high-temperature condensate minerals in a fine-grained, Ca-Al-rich inclusion from CV chondrite” Solar System symposium in Sapporo 2023.

5. 永島一秀、川崎教行、坂本直哉、坂本尚義 (2022) 「リュウグウ試料の局所その場同位体分析からわかったリュウグウ母天体の水質変成温度と年代」 2022年度 日本地球化学会 第69回年会.

誌上発表

1. Kawasaki N., Yamamoto D., Wada S., Park C., Kim H., Sakamoto N. and Yurimoto H. (2024) “ ^{26}Al - ^{26}Mg chronology of high-temperature condensate hibonite in a fine-grained, Ca-Al-rich inclusion from reduced CV chondrite” *Meteoritics & Planetary Science*, 59, 630–639.
2. Suzumura A., Kawasaki N., Yurimoto H. and Itoh S. (2024) “Condensation of refractory minerals on igneous compact Type A Ca-Al-rich inclusion from Northwest Africa 7865 CV chondrite” *Meteoritics & Planetary Science*, doi.org/10.1111/maps.14222.
3. Yamamoto D., Kawasaki N., Tachibana S., Ishizaki L., Sakurai R. and Yurimoto H. (2024) “An experimental simulation of oxygen isotope exchange reaction between amorphous silicate dust and carbon monoxide gas in the early Solar System” *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 374, 93–105.
4. Bajo K., Kawasaki N., Sakaguchi I., Suzuki T. T., Itose S., Matsuya M., Ishihara M., Uchino K. and Yurimoto H. (2024) “In Situ Helium Isotope Microimaging of Meteorites” *Analytical Chemistry*, 96, 5143–5149.

5. Fujiya W., Kawasaki N., Nagashima K., Sakamoto N. and 85 coauthors (2023) “Carbonate record of temporal change in oxygen fugacity and gaseous species in asteroid Ryugu” *Nature Geoscience*, 16, 675–682.
6. Kita N. T., Kawasaki N. (4th of 89 authors) et al. (2023) “Disequilibrium oxygen isotope distribution among aqueously altered minerals in Ryugu asteroid returned samples” *Meteoritics & Planetary Science*, doi.org/10.1111/maps.14163.
7. Aléon J., Kawasaki N. (7th of 93 authors) et al. (2023) “Hydrogen in magnetite from asteroid Ryugu” *Meteoritics & Planetary Science*, doi.org/10.1111/maps.14139.
8. Yokoyama T., Kawasaki N. (34th of 147 authors) et al. (2023) “Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites” *Science*, eabn7850.
9. Piani L., Kawasaki N. (3rd of 88 authors) et al. (2023) “Hydrogen Isotopic Composition of Hydrous Minerals in Asteroid Ryugu” *The Astrophysical Journal Letters*, 946, L43 (11pp).
10. 川崎 教行 (2023) 「隕石の難揮発性包有物 CAI の Al-Mg 年代学」, *地球化学*, 57, 1–12.
11. Kawasaki N., Nagashima K., Sakamoto N., Matsumoto T. and 90 coauthors. (2022) “Oxygen isotopes of anhydrous primary minerals show kinship between asteroid Ryugu and comet 81P/Wild2” *Science Advances*, 8 (50), eade2067.