

小惑星リュウグウは太陽系初期世代の天体の残骸

～リュウグウのもととなった天体は 45.65 億年以上前に誕生～

ポイント

- ・小惑星「リュウグウ」の試料に含まれる炭酸塩鉱物ができた年代と温度を測定。
- ・「リュウグウ」のもととなった天体が、45.65 億年以上前に誕生したことを解明。
- ・「リュウグウ」が、太陽系初期世代の炭素質微惑星の残骸であることを示唆。

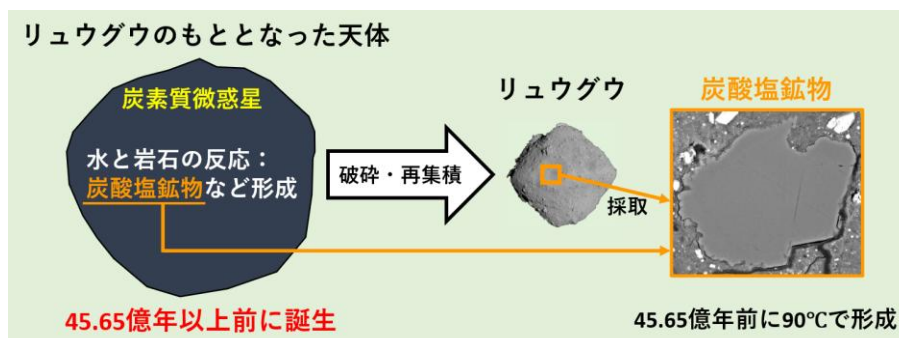
概要

北海道大学大学院理学研究院の川崎教行准教授及び坂本尚義名誉教授、同大学総合イノベーション創発機構の坂本直哉准教授、茨城大学学術研究院基礎自然科学野の藤谷 渉准教授、海洋研究開発機構の荒川創太研究員、東京科学大学大学院の横山哲也教授、東京大学大学院理学系研究科附属宇宙惑星科学機構（UTOPS）の橘 省吾教授らの研究グループは、宇宙航空研究開発機構の小惑星探査機「はやぶさ2」が小惑星「リュウグウ」から採取した試料に含まれる炭酸塩鉱物ができた年代と温度を調べ、「リュウグウ」のもととなった天体が、現在から 45.65 億年以上前に誕生したことを明らかにしました。

小惑星「リュウグウ」は、水を含む鉱物や有機物に富む炭素質の小惑星であり、太陽系が誕生した頃の物質をよく残していると考えられています。これまでの研究から、「リュウグウ」の主要な構成物質は、もととなった天体の内部で氷が溶けて生じた水溶液と岩石との反応によって作られたことが分かっていました。しかし、そのような構成物質や、「リュウグウ」のもととなった天体そのものがいつ誕生したのかは、明らかになっていませんでした。

本研究では、北海道大学の同位体顕微鏡^{*1}を用いた測定により、「リュウグウ」試料に含まれる炭酸塩鉱物ができた年代と温度を明らかにしました。さらに、得られた年代と温度を、天体内部の温度変化を再現する数値シミュレーションと比較しました。その結果、「リュウグウ」のもととなった天体は、現在から 45.65 億年以上前、すなわち太陽系の形成が始まってから約 200 万年以内に誕生していたことが分かりました。これまで知られている他の多くの炭素質天体の誕生年は 45.65 億年ほど古くないので、この天体は、他の多くの炭素質天体に先駆けて誕生した、初期世代の炭素質微惑星であったと考えられます。現在の小惑星「リュウグウ」は、この天体が破砕され、その破片が集まってできた天体、すなわち初期世代の炭素質微惑星の残骸です。本研究結果により、太陽系形成の最初の数百年間に、炭素質微惑星が複数の世代にわたって誕生した可能性が示唆されました。

なお、本研究結果は、2026 年 9 月 10（木）公開の Science 誌にオンライン掲載されました。



「リュウグウ」のもととなった天体は 45.65 億年以上前に誕生した。その後、天体が破砕され、その破片が再集積して、現在の小惑星「リュウグウ」ができたと考えられている。

【背景】

小惑星「リュウグウ」は、水を含む鉱物や有機物に富む炭素質の小惑星です。宇宙航空研究開発機構の小惑星探査機「はやぶさ 2」によって「リュウグウ」から地球に持ち帰られた試料は、太陽系が誕生した頃の物質をよく残していると考えられており、水・有機物に富む天体が形成された過程や天体内部における物質進化過程を詳しく調べられるようになりました。

これまでの研究から、現在の「リュウグウ」は、より大きな天体が壊れた後、その破片が集まってできた小惑星であることが分かっています。また、「リュウグウ」試料の大部分は、もととなった天体の内部で氷が溶けて生じた水溶液と岩石との反応によって作られた鉱物や有機物であることも分かっています。しかし、そのような構成物質や、「リュウグウ」のもととなった天体そのものがいつ誕生したのかは、明らかになっていませんでした。

【研究手法】

天体内部において水溶液と岩石との反応によって作られた炭酸塩鉱物や磁鉄鉱には、水溶液との反応が起こった時期や温度に関する情報が残されています。本研究では、「リュウグウ」試料に含まれる炭酸塩鉱物の一つであるドロマイト^{*2}について、北海道大学の同位体顕微鏡を用いて、マンガンとクロムの同位体組成を分析し、Mn–Cr 放射年代測定法^{*3}によってドロマイトができた年代を調べました。

これまでも「リュウグウ」のドロマイトの年代測定は行われていましたが、研究によって得られた年代に大きな違いがありました。その原因の一つとして、年代測定データの補正に用いる標準試料の違いが指摘されていました。そこで本研究では、茨城大学で合成されたマンガンとクロムの比が均一な人工ドロマイトを用いた先行研究 (Sugawara et al. 2024, *Geochimica et Cosmochimica Acta*) の補正法を採用し、より正確な年代測定を行いました。

また、「リュウグウ」試料に含まれるドロマイトと磁鉄鉱の酸素同位体組成を測定し、酸素同位体平衡温度計^{*4}を用いて、これらの鉱物ができた温度を求めました。さらに、得られた年代と温度を、天体内部の温度変化を再現する数値シミュレーションと比較しました。

【研究成果】

Mn–Cr 放射年代測定の結果、今回新たに分析した「リュウグウ」試料のドロマイトは、約 45 億 6530 万年前にできたことが分かりました (図 1)。これは、上述の先行研究で分析された別の「リュウグウ」試料のドロマイトよりも古い年代です。また、酸素同位体平衡温度計によって、このドロマイトが約 90°C の水溶液からできたことも明らかになりました。

「リュウグウ」のもととなった天体は、誕生した直後には非常に低温 (約–200°C 以下) でした。その後、放射性同位体の崩壊熱などにより内部が温められてドロマイトができた約 90°C に達するまでには、数値シミュレーションによると、少なくとも数十万年の時間を要します。そのため、ドロマイトができるよりも数十万年以上前には、もととなった天体そのものが誕生していた必要があります。したがって、「リュウグウ」のもととなった天体は、約 45 億 6530 万年よりも前、すなわち太陽系の形成が始まってから約 200 万年以内に誕生していたことが分かりました。

他の多くの炭素質コンドライト隕石^{*5}には、コンドリュール^{*6}と呼ばれる、初期太陽系で高温に加熱されてできた球状の岩石粒子が豊富に含まれています。これらのコンドリュールの多くは、太陽系の形成が始まってから約 220 万年後以降にできたことが分かっています。そのため、「リュウグウ」のもととなった天体は、これらのコンドリュールが形成される以前に誕生していたことになります。つまり、「リュウグウ」のもととなった天体は、コンドリュールを豊富に含む他の炭素質コンドライト

隕石のもととなった天体に先駆けて誕生した、初期世代の炭素質微惑星であったと考えられます。現在の「リュウグウ」は、その破片が集まってできた小惑星であり、この初期世代の炭素質微惑星の残骸です。本研究成果により、太陽系形成の最初の数百万年間に、炭素質微惑星が複数の世代にわたって誕生した可能性が示唆されました。

【今後への期待】

本研究により、「リュウグウ」のもととなった天体の特異な形成時期が明らかになりました。今後は、「リュウグウ」と化学的に類似した炭素質小惑星「ベヌー」からアメリカ航空宇宙局（NASA）の小惑星探査機「OSIRIS-REx」により採取された試料についても年代を調べ、両者のもととなった天体のできた時期やその後の進化を比較することが重要です。こうした比較を通じて、水や有機物に富む炭素質微惑星の起源と進化の理解がさらに進むと期待されます。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科研費 JP22K18722、JP23K22550、JP24KK0072、JP25H00678、公益財団法人山田科学振興財団 2022 年度研究援助、公益財団法人北海道科学技術総合振興センター（ノーステック財団）2022 年度若手研究人材育成事業、並びに公益財団法人日揮・実吉奨学会 2024 年度研究助成の支援を受けて実施されました。

論文情報

論文名	The parent bodies of Ryugu and Ivuna formed before those of other carbonaceous chondrites（小惑星リュウグウとイヴナ型隕石の母天体は他の炭素質隕石の母天体よりも前に形成された）
著者名	川崎教行 ^{1*} 、永島一秀 ² 、坂本直哉 ³ 、藤谷 渉 ⁴ 、荒川創太 ⁵ 、馬上謙一 ¹ 、木多紀子 ⁶ 、北島宏輝 ⁶ 、Alexander N. Krot ² 、Gary R. Huss ² 、阿部善也 ⁷ 、Jérôme Aléon ⁸ 、Conel M. O'D. Alexander ⁹ 、甘利幸子 ¹⁰ 、Yuri Amelin ¹¹ 、Martin Bizzarro ¹² 、Audrey Bouvier ¹³ 、Richard W. Carlson ⁹ 、Marc Chaussidon ¹⁴ 、Byeon-Gak Choi ¹⁵ 、Nicolas Dauphas ^{16、17} 、Andrew M. Davis ¹⁶ 、Tommaso Di Rocco ¹⁸ 、深井稜汰 ¹⁹ 、Ikshu Gautam ²⁰ 、羽場麻希子 ²⁰ 、日比谷由紀 ^{21、22} 、日高 洋 ²³ 、本間 寿 ²⁴ 、飯塚 毅 ²⁵ 、Trevor R. Ireland ²⁶ 、石川 晃 ²⁰ 、伊藤正一 ²⁷ 、Thorsten Kleine ²⁸ 、駒谷慎太郎 ²⁹ 、Ming-Chang Liu ^{30、31} 、増田雄樹 ²⁰ 、本村和子 ³² 、Frédéric Moynier ¹⁴ 、中井 泉 ³³ 、Ann Nguyen ³⁴ 、Larry Nittler ⁹ 、Andreas Pack ¹⁸ 、Changkun Park ³⁵ 、Laurette Piani ³⁶ 、Liping Qin ³⁷ 、Sara S. Russell ³⁸ 、Maria Schönbächler ³⁹ 、寺田健太郎 ⁴⁰ 、寺田靖子 ⁴¹ 、臼井寛裕 ¹⁹ 、和田壮平 ¹ 、Meenakshi Wadhwa ⁴² 、Richard J. Walker ⁴³ 、山下勝行 ⁴⁴ 、Qing-Zhu Yin ⁴⁵ 、横山哲也 ²⁰ 、米田成一 ⁴⁶ 、Edward D. Young ³⁰ 、由井宏治 ⁴⁷ 、Ai-Cheng Zhang ⁴⁸ 、中村智樹 ⁴⁹ 、奈良岡浩 ⁵⁰ 、野口高明 ²⁷ 、岡崎隆司 ⁵⁰ 、坂本佳奈子 ¹⁹ 、薮田ひかる ⁵¹ 、安部正真 ¹⁹ 、宮崎明子 ¹⁹ 、中藤亜衣子 ¹⁹ 、西村征洋 ¹⁹ 、岡田達明 ¹⁹ 、矢田 達 ¹⁹ 、与賀田佳澄 ¹⁹ 、中澤 暁 ¹⁹ 、佐伯孝尚 ¹⁹ 、田中 智 ¹⁹ 、照井冬人 ⁵² 、津田雄一 ¹⁹ 、渡邊誠一郎 ²³ 、吉川 真 ¹⁹ 、橘 省吾 ⁵³ 、塚本尚義 ¹ （ ¹ 北海道大学大学院理学院地球惑星科学部門、 ² Hawai'i Institute of Geophysics and Planetology, University of Hawai'i at Mānoa, Honolulu, USA、 ³ 北海道大学総合イノベーション創発機構、 ⁴ 茨城大学理学部、 ⁵ 海洋研究開発機構数理科学・先端技術研究センター、 ⁶ Department of Geoscience, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA、 ⁷ 東京電機大学大学院工学研究科、 ⁸ Sorbonne

Université, Muséum National d'Histoire Naturelle, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Recherche pour le Développement, Paris, France、⁹Earth and Planets Laboratory, Carnegie Institution for Science, Washington, DC, USA、¹⁰Department of Physics and McDonnell Center for the Space Sciences, Washington University, St. Louis, USA、¹¹Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China、¹²Centre for Star and Planet Formation, Globe Institute, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark、¹³Bayerisches Geoinstitut, Universität Bayreuth, Bayreuth Germany、¹⁴Université Paris Cité, Institut de physique du globe de Paris, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Recherche pour le Développement, Paris, France、¹⁵Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea、¹⁶Department of the Geophysical Sciences, The University of Chicago, Chicago, IL, USA、¹⁷Department of Earth and Planetary Sciences, The University of Hong Kong, Pok Fu Lam, Hong Kong、¹⁸Faculty of Geosciences and Geography, University of Göttingen, Göttingen, Germany、¹⁹宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、²⁰東京科学大学理学院地球惑星科学系、²¹東京大学総合システム工学研究室、²²海洋研究開発機構海底資源研究プログラム、²³名古屋大学理学部地球惑星科学科、²⁴株式会社堀場テクノサービス分析技術本部、²⁵東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、²⁶School of Earth and Environmental Sciences, The University of Queensland, St Lucia, Australia、²⁷京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、²⁸Max Planck Institute for Solar System Research, Göttingen, Germany、²⁹株式会社堀場テクノサービス分析技術本部、³⁰Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California, Los Angeles, Los Angeles, USA、³¹Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA、³²株式会社リガクアプリケーションラボ熱分析グループ、³³東京理科大学理学部応用化学科、³⁴Astromaterials Research and Exploration Science, NASA Johnson Space Center, Houston, TX, USA、³⁵Earth-System Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, Republic of Korea、³⁶Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Centre national de la recherche scientifique, Université de Lorraine, Nancy, France、³⁷University of Science and Technology of China, School of Earth and Space Sciences, Anhui, China、³⁸Department of Earth Sciences, Natural History Museum, London, UK、³⁹Institute for Geochemistry and Petrology, Department of Earth Sciences, Eidgenössische Technische Hochschule Zurich, Zurich, Switzerland、⁴⁰大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻、⁴¹高輝度光科学研究センター分光・イメージング推進室、⁴²School of Earth and Space Exploration, Arizona State University, Tempe, AZ, USA、⁴³Department of Geological, Environmental, and Planetary Science, University of Maryland, College Park, MD, USA、⁴⁴岡山大学大学院環境生命自然科学研究科、⁴⁵Earth and Planetary Sciences, University of California, Davis, CA, USA、⁴⁶国立科学博物館 理工学研究部、⁴⁷東京理科大学理学部第一部化学科、⁴⁸School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, China、⁴⁹東北大学大学院理学研究科地学専攻、⁵⁰九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、⁵¹広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学プログラム、⁵²神奈川工科大学、⁵³東京大学惑星・宇宙科学機構、*責任著者)

雑誌名 Science (米科学誌)

D O I 10.1126/science.adw4498

公表日 2026 年 9 月 10 日 (木) (オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院 准教授 川崎教行 (かわさきのりゆき)

T E L 011-706-3586 メール kawasaki@eis.hokudai.ac.jp

茨城大学学術研究院基礎自然科学野 准教授 藤谷 渉 (ふじやわたる)

T E L 029-228-8387 メール wataru.fujiya.sci@vc.ibaraki.ac.jp

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

茨城大学広報・アウトリーチ支援室 (〒310-8512 水戸市文京 2-1-1)

T E L 029-228-8008 F A X 029-228-8019 メール koho-prg@ml.ibaraki.ac.jp

海洋研究開発機構企画部門事業推進部報道室 (〒237-0061 横浜市金沢区昭和町 3173-25)

T E L 045-778-5690 メール press@jamstec.go.jp

東京科学大学総務企画部広報課 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

T E L 03-5734-2975 F A X 03-5734-3661 メール media@adm.isct.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科・理学部広報室 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

T E L 03-5841-7585 メール media.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

【参考図】

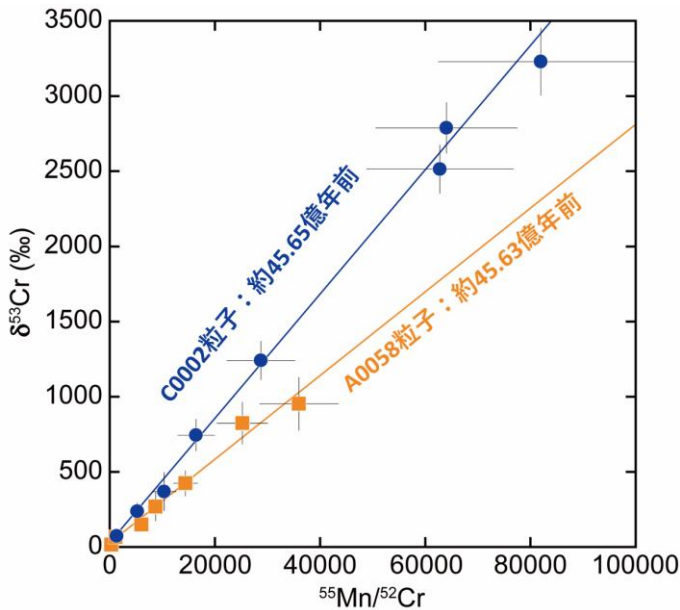


図 1. 「リュウグウ」試料に含まれる炭酸塩鉱物ドロマイトの Mn–Cr 放射年代測定の結果。青色は C0002 粒子（二度目のタッチダウンで採取された試料）、橙色は A0058 粒子（一度目のタッチダウンで採取された試料）を示す。直線の傾きの違いから、両試料のドロマイトが異なる時期にできたことが分かる。本研究では新たに、C0002 粒子のドロマイトが約 45 億 6530 万年前にできたことを明らかにした。また、その形成温度が約 90°Cと求められた。

【用語解説】

- *1 同位体顕微鏡 … 二次イオン質量分析計の一種。試料表面にイオンビームを照射し、そこから放出されるイオン（二次イオン）を質量電荷比ごとに分けて測定する装置。鉱物中の微小な領域について、元素や同位体の組成を精密に調べることができる。
- *2 ドロマイト … カルシウムとマグネシウムを主成分とする炭酸塩鉱物の一種。化学式 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ で表される。「リュウグウ」では、もととなった天体の内部で氷が溶けて生じた水溶液と岩石が反応する過程で形成された。
- *3 Mn–Cr 放射年代測定法 … 放射性同位体 Mn-53 が半減期約 370 万年で Cr-53 に壊変することを利用した年代測定法。太陽系形成後の数百万年間に起こった現象の年代測定に適している。本研究では、ドロマイトの Mn–Cr 同位体組成から、その形成時期を決定した。
- *4 酸素同位体平衡温度計 … 同じ水溶液と酸素同位体平衡にあった二つの鉱物の間に生じる酸素同位体組成の差は、温度によって変化する。この温度依存性を利用して、二つの鉱物の酸素同位体組成の差から形成時の温度を求める方法。本研究では、ドロマイトと磁鉄鉱の酸素同位体組成の差から温度を求めた。
- *5 炭素質コンドライト隕石 … 太陽系初期の物質を比較的よく保存している始原的な隕石の一群。化学組成、鉱物組成、同位体組成などの違いによって、いくつかのグループに分類される。多くの炭素質コンドライトにはコンドリュールが豊富に含まれる一方、リュウグウとよく似た CI 型（イヴナ型）にはコンドリュールがほとんど含まれない。
- *6 コンドリュール … CI 型（イヴナ型）を除く多くの炭素質コンドライト隕石に豊富に含まれる、直径 1 mm 程度の球状の粒子。初期太陽系の原始惑星系円盤内で岩石物質が一度高温で溶融し、その後急速に冷却して形成されたと考えられている。