

小惑星リュウグウは彗星の近くで誕生

～内側太陽系から外側太陽系へと旅した高温鉱物をリュウグウから多数発見～

ポイント

- ・C型小惑星「リュウグウ」から1000°C以上の高温環境で形成した鉱物を多数発見。
- ・これら高温鉱物は内側太陽系で形成後、外側太陽系まで輸送され「リュウグウ」等の母天体に集積。
- ・「リュウグウ」は、通常の炭素質隕石よりも太陽から遠い、彗星に近い領域で形成。

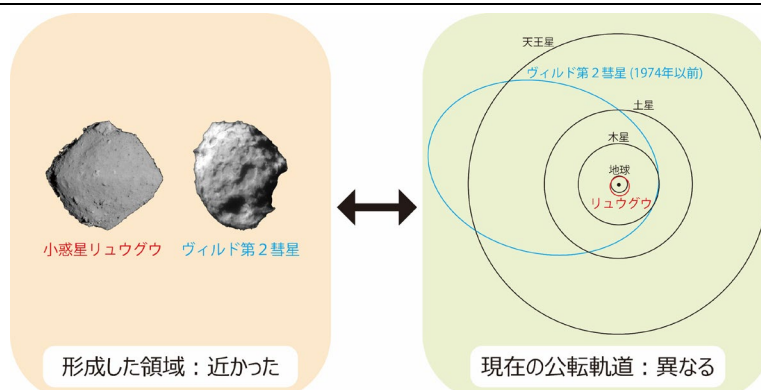
概要

北海道大学大学院理学研究院の川崎教行准教授及び塚本尚義教授、京都大学白眉センターの松本徹特定助教、東京工業大学理学院地球惑星科学系の横山哲也教授、東京大学大学院理学系研究科の橘省吾教授らの研究チームは、宇宙航空研究開発機構の小惑星探査機「はやぶさ2」がC型小惑星「リュウグウ」から採取したサンプル中に、初期太陽系の高温環境で形成した鉱物を多数発見しました。

これまでの「はやぶさ2」初期分析により、「リュウグウ」はイヴナ型炭素質隕石*1に類似した物質であり、主に低温（約40°C）の水溶液からの析出物で構成されることが分かっていました。研究チームは、「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石から、高温環境（1000°C以上）で形成した鉱物を新たに多数見つけ出し、そのうち40粒子について、北海道大学の同位体顕微鏡（二次イオン質量分析計）を用いた分析を行い、その起源を特定しました。その結果、「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石の高温鉱物は、起源の異なる2種にはっきりと分けられました。それら高温鉱物は、内側太陽系の高温環境で形成した後、外側太陽系まで輸送され、「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石の母天体に集積したことが分かりました。

また、2種の高温鉱物の存在比率は、通常の炭素質隕石とは大きく異なっていただけでなく、米国NASAが2004年にスターダストミッションでヴィルド第2彗星から採取したサンプルと非常に似通っていました。このことから、「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石は、通常の炭素質隕石の母天体よりも太陽から遠い、彗星により近い領域で形成したことが分かりました。

なお、本研究結果は、2022年12月16日（金）、Science Advances 誌にオンライン掲載されました。



現在のリュウグウとヴィルド第2彗星の公転軌道は異なっている。しかし、天体に含まれている高温鉱物の酸素同位体組成は、両者の形成場所が近かったことを示唆している。

【背景】

これまでの「はやぶさ 2」初期分析により、C 型小惑星「リュウグウ」は、イヴナ型炭素質隕石に類似した物質であり、主に低温（約 40°C）の水溶液から析出した鉱物で構成されることが分かっています。このような鉱物は、「リュウグウ」の母天体において氷の融解より発生した水溶液が「リュウグウ」に元々あった鉱物を変質させることでできたものです。こうした変質作用が起きたのは、太陽系誕生から約 500 万年後であったことが分かっています。そのため、それ以前の初期太陽系の情報を得ることはできていませんでした。

そこで研究チームは、「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石の中から、太陽系誕生から約 500 万年後に起きていた低温の水溶液の変質作用を生き残った初生鉱物（氷が存在していた時代に「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石母天体に含まれていた鉱物）を探索し、その起源を決定しました。

【研究手法】

「はやぶさ 2」が採取した「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石を北海道大学の走査電子顕微鏡で形状観察、化学組成分析し、水溶液の変質作用を生き残った初生鉱物を探索しました。そして、それらの鉱物の起源を特定するために、北海道大学の同位体顕微鏡（二次イオン質量分析計）を用いて、酸素の同位体組成を測定しました。

【研究成果】

「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石から、かんらん石、輝石、スピネルといった、水溶液の変質作用を生き残った初生鉱物を数十粒子発見しました（図 1、2）。これらの鉱物は大変まれに存在し、大きさも数十 μm 以下と大変小さいものでした。その中から、計 40 粒子について酸素の同位体組成を測定すると、その同位体組成ははっきりと 2 つに分かれました（図 3）。このうち、惑星型の酸素同位体組成（図 3 の右上側）を示す鉱物は、内側太陽系で形成したコンドリュール*² と呼ばれる物質を起源とし、一方で太陽型の酸素同位体組成（図 3 の左下側）を示す鉱物は、約 46 億年前に原始太陽近傍で形成した難揮発性包有物*³ を起源とするものであることが分かりました。それぞれの鉱物は、ともに原始太陽系星雲の 1000°C 以上の高温環境で形成したものです。そのような高温鉱物は、高温環境で形成した後に、冷たい外側太陽系領域まで輸送され、「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石の母天体に集積したことが分かりました。また、「リュウグウ」とイヴナ型炭素質隕石とで、高温鉱物の種類や産状は同一であり、「リュウグウ」とイヴナ型炭素質隕石の類似性がより明らかになりました。

太陽型と惑星型の 2 種の酸素同位体組成をもつ高温鉱物の存在比率は、通常の（イヴナ型以外の）炭素質隕石のものと全く異なりました。通常の炭素質隕石においては、こういった高温鉱物のうち、太陽型のものは約 2% です。一方で今回明らかになった、「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石においては、太陽型が約 32% を占めました。このことから、「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石の母天体が形成した領域は、通常の炭素質隕石とは異なっていることが分かりました。

さらに、米国 NASA が 2004 年にスターダストミッションでヴィルド第 2 彗星から採取したサンプルにおいては、太陽型の割合が約 29% であることが分かっています。このヴィルド第 2 彗星の値は、「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石と非常に似通っています。この類似性から、研究チームは、「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石の母天体は、彗星により近い領域で形成されたと結論し、通常の炭素質隕石の母天体よりもさらに太陽から遠い場所であったと考えています。

【今後への期待】

本研究成果により、「リュウグウ」と他の隕石との形成領域の関係性が明らかになりました。川崎教行准教授と坂本尚義教授は、米国 NASA が 2023 年に持ち帰る B 型小惑星 Bennu（ベンヌ）の初期分析チームのメンバーでもあり、本研究手法の Bennu サンプルへの応用が期待されます。

【前回プレスリリースとの違い】

2022 年 10 月 21 日付けプレスリリース「リュウグウは太陽系の果てからやってきた～リュウグウが持つ原子核合成の記録がリュウグウの誕生地を示唆～」

(<https://www.hokudai.ac.jp/news/2022/10/post-1110.html>)

この研究では、リュウグウとイヴナ型炭素質隕石の鉄の同位体組成が、通常の炭素質隕石のものとは異なることを発見し、それぞれが異なる場所で形成したことを示唆し、リュウグウとイヴナ型炭素質隕石の母天体が天王星・海王星領域で産まれたことを予想しました。しかしながら、リュウグウと外側太陽系物質との直接的な比較はできておらず、消去法的な予測に留まっていました。一方今回の研究では、リュウグウとヴィルド第 2 彗星に含まれる物質の直接比較に成功し、その共通性を明らかにしました。

論文情報

論文名	Oxygen isotopes of anhydrous primary minerals show kinship between asteroid Ryugu and comet 81P/Wild2 (無水一次鉱物の酸素同位体組成が示す小惑星リュウグウと 81P/Wild2 彗星の近親関係)
著者名	Noriyuki Kawasaki ^{1*} , Kazuhide Nagashima ² , Naoya Sakamoto ³ , Toru Matsumoto ^{4,5} , Ken-ichi Bajo ¹ , Sohei Wada ¹ , Yohei Igami ⁵ , Akira Miyake ⁵ , Takaaki Noguchi ⁵ , Daiki Yamamoto ⁶ , Sara S. Russell ⁷ , Yoshinari Abe ⁸ , Jérôme Aléon ⁹ , Conel M. O'D. Alexander ¹⁰ , Sachiko Amari ^{11,12} , Yuri Amelin ¹³ , Martin Bizzarro ¹⁴ , Audrey Bouvier ¹⁵ , Richard W. Carlson ¹⁰ , Marc Chaussidon ¹⁶ , Byeon-Gak Choi ¹⁷ , Nicolas Dauphas ¹⁸ , Andrew M. Davis ¹⁸ , Tommaso Di Rocco ¹⁹ , Wataru Fujiya ²⁰ , Ryota Fukai ²¹ , Ikshu Gautam ⁶ , Makiko K. Haba ⁶ , Yuki Hibiya ²² , Hiroshi Hidaka ²³ , Hisashi Homma ²⁴ , Peter Hoppe ²⁵ , Gary R. Huss ² , Kiyohiro Ichida ²⁶ , Tsuyoshi Iizuka ²⁷ , Trevor R. Ireland ²⁸ , Akira Ishikawa ⁶ , Motoo Ito ²⁹ , Shoichi Itoh ⁵ , Noriko T. Kita ³⁰ , Kouki Kitajima ³⁰ , Thorsten Kleine ³¹ , Shintaro Komatani ²⁶ , Alexander N. Krot ² , Ming-Chang Liu ^{32,33} , Yuki Masuda ⁶ , Kevin D. McKeegan ³² , Mayu Morita ²⁶ , Kazuko Motomura ³⁴ , Frédéric Moynier ¹⁶ , Izumi Nakai ³⁵ , Ann Nguyen ³⁶ , Larry Nittler ¹⁰ , Morihiko Onose ²⁶ , Andreas Pack ¹⁹ , Changkun Park ³⁷ , Laurette Piani ³⁸ , Liping Qin ³⁹ , Maria Schönbächler ⁴⁰ , Lauren Tafla ³² , Haolan Tang ³² , Kentaro Terada ⁴¹ , Yasuko Terada ⁴² , Tomohiro Usui ²⁰ , Meenakshi Wadhwa ⁴³ , Richard J. Walker ⁴⁴ , Katsuyuki Yamashita ⁴⁵ , Qing-Zhu Yin ⁴⁶ , Tetsuya Yokoyama ⁶ , Shigekazu Yoneda ⁴⁷ , Edward D. Young ³² , Hiroharu Yui ⁴⁸ , Ai-Cheng Zhang ⁴⁹ , Tomoki Nakamura ⁵⁰ , Hiroshi Naraoka ⁵¹ , Ryuji Okazaki ⁵¹ , Kanako Sakamoto ²¹ , Hikaru Yabuta ⁵² , Masanao Abe ²¹ , Akiko Miyazaki ²¹ , Aiko Nakato ²¹ , Masahiro Nishimura ²¹ , Tatsuaki Okada ²¹ , Toru Yada ²¹ , Kasumi Yogata ²¹ , Satoru Nakazawa ²¹ , Takanao Saiki ²¹ , Satoshi Tanaka ²¹ , Fuyuto Terui ⁵³ , Yuichi Tsuda ²¹ , Sei-ichiro Watanabe ²³ , Makoto Yoshikawa ²¹ , Shogo Tachibana ⁵⁴ , Hisayoshi Yurimoto ^{1,3} (¹ Department of Natural History Sciences, Hokkaido University; Sapporo 060-0810, Japan. ² Hawai'i Institute of Geophysics and Planetology, University of Hawai'i at Mānoa; Honolulu, HI 96822, USA. ³ Isotope Imaging

Laboratory, Creative Research Institution, Hokkaido University; Sapporo 001-0021, Japan.

⁴The Hakubi Center for Advanced Research, Kyoto University; Kitashirakawaoiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan. ⁵Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University; Kitashirakawaoiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan. ⁶Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology; Tokyo 152-8551, Japan.

⁷Department of Earth Sciences, Natural History Museum; London, SW7 5BD, UK.

⁸Graduate School of Engineering Materials Science and Engineering, Tokyo Denki University; Tokyo 120-8551, Japan. ⁹Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie, Sorbonne Université, Museum National d'Histoire Naturelle, Centre National de la Recherche Scientifique Unité Mixte de Recherche 7590, IRD; 75005 Paris, France. ¹⁰Earth and Planets Laboratory, Carnegie Institution for Science; Washington, DC, 20015, USA. ¹¹McDonnell Center for the Space Sciences and Physics Department, Washington University; St. Louis, MO 63130, USA. ¹²Geochemical Research Center, The University of Tokyo, Tokyo, 113-0033, Japan. ¹³Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences; Guangzhou, GD 510640, China. ¹⁴Centre for Star and Planet Formation, Globe Institute, University of Copenhagen; Copenhagen, K 1350, Denmark. ¹⁵Bayerisches Geoinstitut, Universität Bayreuth; Bayreuth 95447, Germany.

¹⁶Université de Paris, Institut de physique du globe de Paris, Centre National de la Recherche Scientifique; 75005 Paris, France. ¹⁷Department of Earth Science Education, Seoul National University; Seoul 08826, Republic of Korea. ¹⁸Department of the Geophysical Sciences and Enrico Fermi Institute, The University of Chicago; Chicago, IL 60637, USA. ¹⁹Faculty of Geosciences and Geography, University of Göttingen; Göttingen, D-37077, Germany. ²⁰Faculty of Science, Ibaraki University; Mito 310-8512, Japan.

²¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency; Sagami-hara 252-5210, Japan. ²²General Systems Studies, The University of Tokyo; Tokyo 153-0041, Japan. ²³Earth and Planetary Sciences, Nagoya University; Nagoya 464-8601, Japan. ²⁴Osaka Application Laboratory, Rigaku Corporation; Osaka 569-1146, Japan. ²⁵Max Planck Institute for Chemistry; Mainz 55128, Germany. ²⁶Analytical Technology, Horiba Techno Service Co., Ltd.; Kyoto 601-8125, Japan. ²⁷Earth and Planetary Science, The University of Tokyo; Tokyo 113-0033, Japan. ²⁸School of Earth and Environmental Sciences, The University of Queensland; St Lucia QLD 4072, Australia. ²⁹Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology; Kochi 783-8502, Japan. ³⁰Geoscience, University of Wisconsin- Madison; Madison, WI 53706, USA. ³¹Max Planck Institute for Solar System Research; 37077 Göttingen, Germany.

³²Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California, Los Angeles; Los Angeles, CA 90095, USA. ³³Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94550, USA. ³⁴Thermal Analysis, Rigaku Corporation; Tokyo 196-8666, Japan. ³⁵Applied Chemistry, Tokyo University of Science; Tokyo 162-8601, Japan. ³⁶Astromaterials Research and Exploration Science Division, National Aeronautics and Space Administration Johnson Space Center; Houston, TX 77058, USA. ³⁷Earth-System Sciences, Korea Polar Research Institute; Incheon 21990, Korea. ³⁸Centre de Recherches Pétrographiques et

Géochimiques, Centre National de la Recherche Scientifique - Université de Lorraine; 54500 Nancy, France. ³⁹University of Science and Technology of China, School of Earth and Space Sciences; Anhui 230026, China. ⁴⁰Institute for Geochemistry and Petrology, Department of Earth Sciences, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich; Zürich, Switzerland. ⁴¹Earth and Space Science, Osaka University; Osaka 560-0043, Japan. ⁴²Spectroscopy and Imaging, Japan Synchrotron Radiation Research Institute; Hyogo 679-5198 Japan. ⁴³School of Earth and Space Exploration, Arizona State University; Tempe, AZ 85281, USA. ⁴⁴Geology, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA. ⁴⁵Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University; Okayama 700-8530, Japan. ⁴⁶Earth and Planetary Sciences, University of California; Davis, CA 95616, USA. ⁴⁷Science and Engineering, National Museum of Nature and Science; Tsukuba 305-0005, Japan. ⁴⁸Chemistry, Tokyo University of Science; Tokyo 162-8601, Japan. ⁴⁹School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University; Nanjing 210023, China. ⁵⁰Department of Earth Science, Tohoku University; Sendai, 980-8578, Japan. ⁵¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University; Fukuoka 819-0395, Japan. ⁵²Earth and Planetary Systems Science Program, Hiroshima University; Higashi-Hiroshima, 739-8526, Japan. ⁵³Kanagawa Institute of Technology; Atsugi 243-0292, Japan. ⁵⁴UTokyo Organization for Planetary and Space Science, University of Tokyo; Tokyo 113-0033, Japan.)

*Corresponding author.

雑誌名 Science Advances

DOI 10.1126/sciadv.ade2067

公表日 2022年12月16日(金)(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@ep.sci.hokudai.ac.jp

U R L <https://www2.sci.hokudai.ac.jp/faculty/researcher/noriyuki-kawasaki>

北海道大学大学院理学研究院 教授 塚本尚義（ゆりもとひさよし）

T E L 011-706-9173 メール yuri@ep.sci.hokudai.ac.jp

U R L <http://vigarano.ep.sci.hokudai.ac.jp>

京都大学白眉センター 特定助教 松本 徹（まつもととおる）

メール matsumoto.toru.2z@kyoto-u.ac.jp

東京工業大学理学院地球惑星科学系 教授 横山哲也（よこやまつや）

T E L 03-5734-3539 メール tetsuya.yoko@eps.sci.titech.ac.jp

U R L <http://www.geo.titech.ac.jp/lab/yokoyama/>

東京大学大学院理学系研究科附属宇宙惑星科学機構 教授 橘 省吾（たちばなしょうご）

メール tachi@eps.s.u-tokyo.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

京都大学総務部広報課国際広報室（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）

T E L 075-753-5727 F A X 075-753-2094 メール comms@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

東京工業大学総務部広報課（〒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@jim.titech.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 03-5841-0654 メール media.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

【参考図】

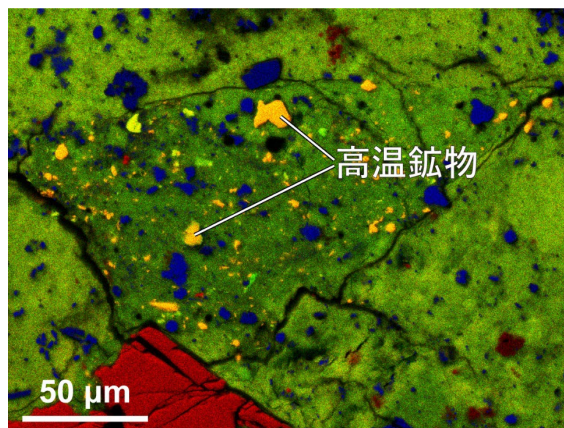


図 1. 「リュウグウ」から発見した高温鉱物（かんらん石）の例。黄色く光って見える粒は全て高温鉱物。データは電子顕微鏡により取得した Mg(赤)–Si(緑)–Fe(青)の合成 X 線元素マップ。
(©Kawasaki et al. 2022)

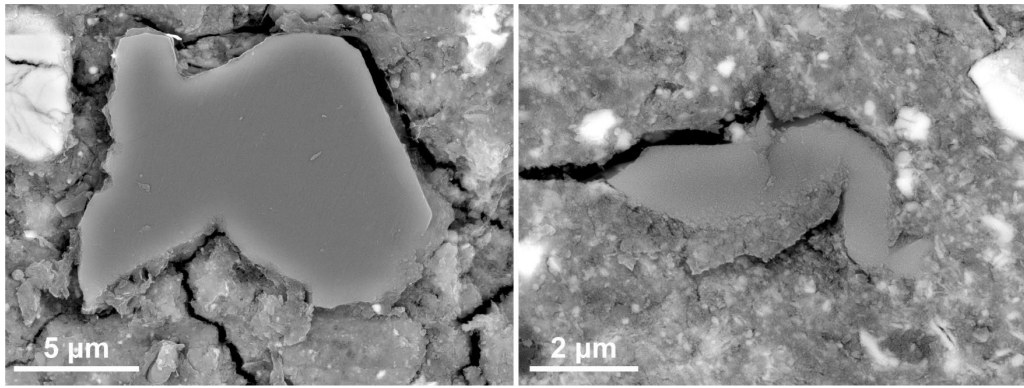


図 2. 「リュウグウ」に含まれる高温鉱物の電子顕微鏡写真。左はかんらん石、右はスピネル。(©Kawasaki et al. 2022)

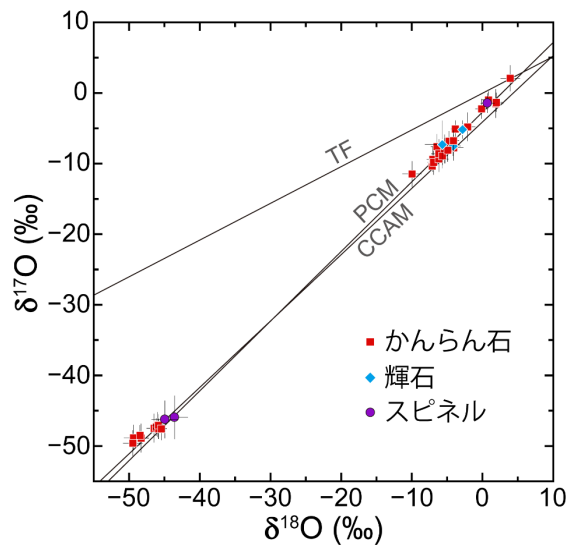


図 3. 「リュウグウ」及びイヴナ型炭素質隕石に含まれる高温鉱物の酸素同位体組成。右上の地球型の酸素同位体組成を示す鉱物はコンドリュールを起源とする。左下の太陽型の酸素同位体組成を示す鉱物は難揮発性包有物を起源とする。(©Kawasaki et al. 2022)

【用語解説】

- *1 イヴナ型炭素質隕石 … 炭素質コンドライト隕石の一つ。地球に存在する数万個の隕石の中でも数個しかない希少なもので、太陽系の平均組成に近い化学組成を示す物質。
- *2 コンドリュール … 隕石に含まれる球粒状の物質。原始太陽系円盤において、高温のメルトから固化した。
- *3 難揮発性包有物 … 隕石に含まれる太陽系最古の物質。原始太陽系円盤の高温のガスから凝縮した。