

国立研究開発法人
宇宙航空研究開発機構
国立大学法人九州大学
国立大学法人茨城大学
国立大学法人北海道大学
国立大学法人東北大学
国立大学法人京都大学
国立大学法人広島大学
国立大学法人東京大学

小惑星探査機「はやぶさ2」初期分析 揮発性成分分析チーム 研究成果の科学誌「Science」論文掲載について

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)では小惑星リュウグウ試料分析を、6つのサブチームからなる「はやぶさ2初期分析チーム」および、2つの「Phase-2 キュレーション機関」にて進めています。

この度「はやぶさ2初期分析チーム」のうち「揮発性成分分析チーム」の研究成果をまとめた論文が、アメリカの科学誌「Science」に2022年10月21日付(日本時間)で掲載されましたのでお知らせします。

小惑星リュウグウ試料の希ガスおよび窒素同位体組成 —リュウグウ揮発性成分の起源と表層物質進化—

原 題: Noble gases and nitrogen in samples of asteroid Ryugu record its volatile sources and recent surface evolution

掲 載 誌: Science

D O I: 10.1126/science.abo0431

概要につきましては、別紙をご参照ください。

小惑星リュウグウ試料の初期分析について

小惑星探査機「はやぶさ2」により2020年12月6日に地球へ帰還したリュウグウ試料は、JAXA宇宙科学研究所に設置された施設において、初期記載(Phase-1 キュレーション)が行われました。試料の一部が、6つのサブチームからなる「はやぶさ2初期分析チーム」と2つの「Phase-2 キュレーション機関」へ分配されました。初期分析チームは「はやぶさ2」の科学目的達成のために専門サブチームが分担して、計画された高精度分析により、試料の多面的価値を明らかにします。Phase-2 キュレーション機関はそれぞれの特徴である総合分析に基づき、個々の「はやぶさ2粒子」に関するカタログを作成すると同時に、粒子の特性に応じた測定・分析により、「はやぶさ2粒子」がもつ潜在的価値を明らかにしていきます。

なお、初期分析の6つのチーム、Phase-2 キュレーション機関からの報告は、論文としての成果が公表されるタイミングで、個別にお知らせしてまいります。また、全ての初期成果が公表されたのち、あらためて「はやぶさ2」サイエンス全体の総括をご説明する予定です。

以上

小惑星リュウグウ試料の希ガスおよび窒素同位体組成
—リュウグウ揮発性物質の起源と表層物質進化—

Noble gases and nitrogen in samples of asteroid Ryugu record
its volatile sources and recent surface evolution

1.概要

小惑星探査機「はやぶさ2」が地球に持ち帰った近地球軌道小惑星リュウグウの表層および地下物質試料の希ガスと窒素の同位体組成を測定しました。リュウグウには太陽系形成時の希ガスがふくまれており、その量はこれまで報告されているどの隕石よりも多いことがわかりました。窒素同位体組成は試料ごとに異なっており、多様な窒素含有物質が今もリュウグウ試料には保存されていることがわかりました。太陽系形成時の始原的ガス以外にも、銀河宇宙線によって生成された希ガスと太陽風起源の2種類の希ガスも含まれていました。多くのリュウグウ試料に含まれる太陽風起源ガスは僅かな量でした。第1回タッチダウン回収試料を10個、第2回タッチダウン回収試料を6個分析しましたが、多くの試料は太陽風希ガスをあまり含んでおらず、2試料だけが現在の軌道でそれぞれ3500年間、250年間の照射に相当する太陽風を含んでいました。太陽風は天体の最表層の物質にしか打ち込まれないため、これらの試料は天体最表層にそれぞれ3500年間、250年間、存在していたことを意味しています。第2回タッチダウン試料は人工クレーター付近から回収しており、地下物質を含んでいると期待されています。第2回タッチダウン試料には太陽風希ガスがあまり含まれていないことから、深さ1-2m程度の地下物質はあまり攪拌されて

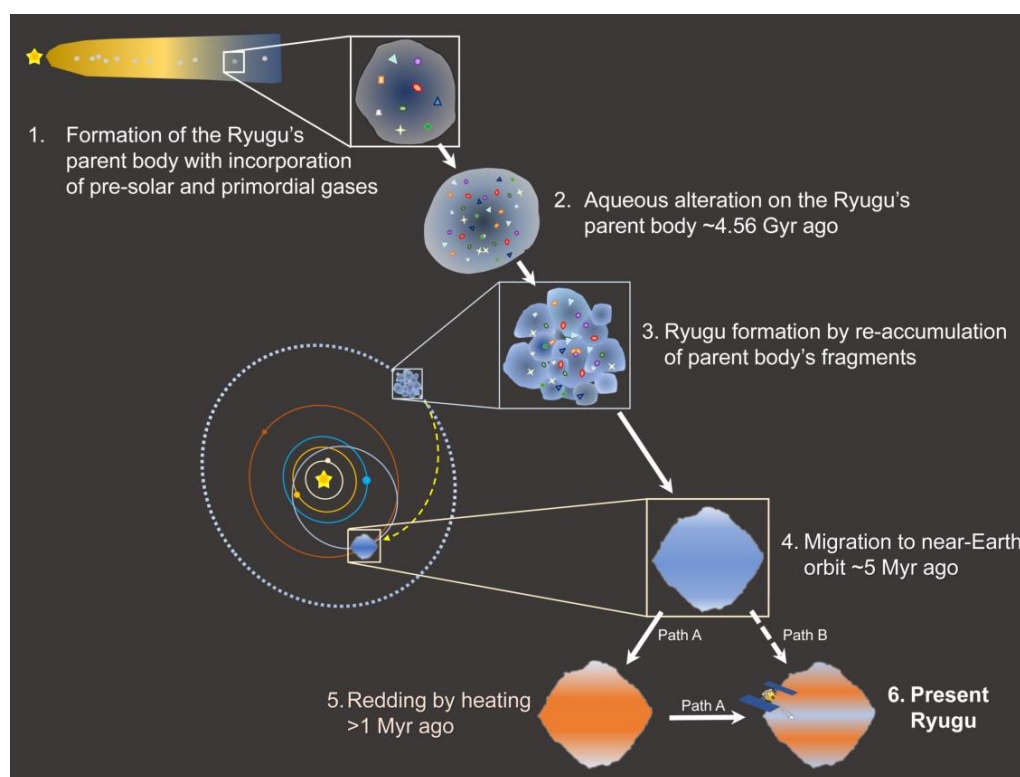


図1:リュウグウの進化図。1. リュウグウ母天体の形成と先太陽および始原的ガスの獲得。2. リュウグウ母天体での水質変質(約45.6億年前)。3. 母天体破片の集積によるリュウグウ形成。4. 近地球軌道への移動(約500万年前)。5. 加熱による赤化(約100万年以上前)。6. 現在のリュウグウ。

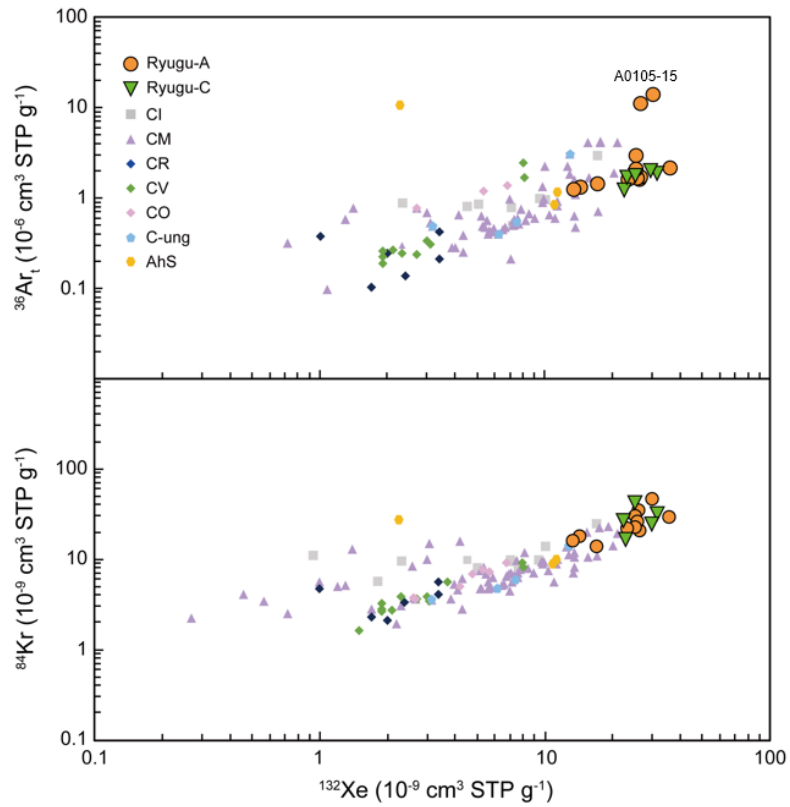
いないことがわかりました。また、銀河宇宙線起源ネオン量から、リュウグウ試料の銀河宇宙線照射期間は約 500 万年であることがわかりました。リュウグウ表面のクレーターには、近地球軌道での衝突で作られたと仮定して計算される年代(200 万年から 800 万年)と、小惑星帯での頻繁な衝突で作られたと仮定して計算される年代(10 万年から 30 万年)が提案されてきました。希ガス分析の結果から得られた銀河宇宙線照射期間は前者の年代に一致しており、リュウグウは約 500 万年前に小惑星軌道から、天体表層への隕石衝突が少ない近地球軌道に移動したと考えられます(図 1)。

また、リュウグウ試料を真空装置内で 100°C に加熱した際、100 万年の照射期間に相当する銀河宇宙線起源のガスが検出されました。このことは、過去 100 万年間はリュウグウ表層物質が 100°C 以上の高温を経験していないことを意味します。リュウグウ表層の中緯度域には可視分光で赤く見える物質が見つっています。赤い物質はリュウグウが太陽に一時期近づいたために強い加熱を受けたためにできたという可能性がこれまでの研究で示唆されています。もし、赤化の原因が太陽近傍での加熱であるなら、それは 100 万年以上前の出来事であったこととなります(図 1)。

2.本文

揮発性成分分析班は、大きさ 1mm 弱(重さにすると 0.3mg 以下)のリュウグウ試料を一粒ずつ(合計 24 粒)、大気に晒すことなく窒素ガス中で平坦なペレット状にし、ペレット表面の赤外分光分析および電子顕微鏡観察を行いました。その結果、揮発性成分分析班に配分されたリュウグウ試料は、岩石鉱物学的にはイブナ型炭素質隕石(CI コンドライト)に似ており、また、他のリュウグウ試料とも似ていることがわかりました。このリュウグウ試料を用いて、希ガスおよび窒素同位体分析のための破壊分析を行いました。

第 1 回タッチダウンで回収した試料(最表層物質、Ryugu-A 試料)10 個、第 2 回タッチダウンで回収した人工クレーター近傍試料(地下物質の存在が期待される、Ryugu-C 試料)6 個に対して、希ガス同位体測定を行いました。太陽系形成時に宇宙空間に存在していた希ガスを含んだ炭素質物質や先太陽系物質(ナノダイヤモンドやグラファイトなど)がリュウグウには大量に含まれていることが判明しました。それらの同位体組成は最も始原的な隕石とされる炭素質コンドライトの一種である CI コンドライトのものと似ており、リュウグウ物質に含まれる希ガスの濃度は CI コンドライトや他のコンドライトよりも多いことがわかりました(図 2)。これは、リュウグウ母天体を形成した材料物質は CI コンドライトと同質のものであるが、炭素質物質や先太陽系物質が多く含まれていたことを示しています。



©Okazaki et al., 2022a

図 2: リュウグウ試料の始原的希ガスの濃度。縦軸に始原的希ガス ^{36}Ar 濃度および ^{84}Kr 濃度、横軸に ^{132}Xe 濃度を示している。リュウグウ試料(オレンジ色丸と緑色逆三角形)はこれまで知られている隕石よりも高濃度の太陽系形成時の希ガスを含んでいる。炭素質コンドライト(灰色四角、紫三角、青菱形、緑菱形、薄紫菱形、水色五角形)およびその他の隕石物質(オレンジ色六角形)も参考のために示している。

4つのリュウグウ試料(Ryugu-Aを2試料、Ryugu-Cを2試料)を分析した結果、窒素の同位体組成および濃度はリュウグウ試料ごとに異なることが判明しました(図3)。このことは、太陽系形成時にリュウグウ母天体に存在した様々な窒素を含む物質が今もリュウグウに残存していることを示唆します。一部のリュウグウ試料は ^{15}N という同位体に乏しく、リュウグウ母天体での水質変質および脱水過程で ^{15}N を多く含む物質が失われたことを示唆しています。

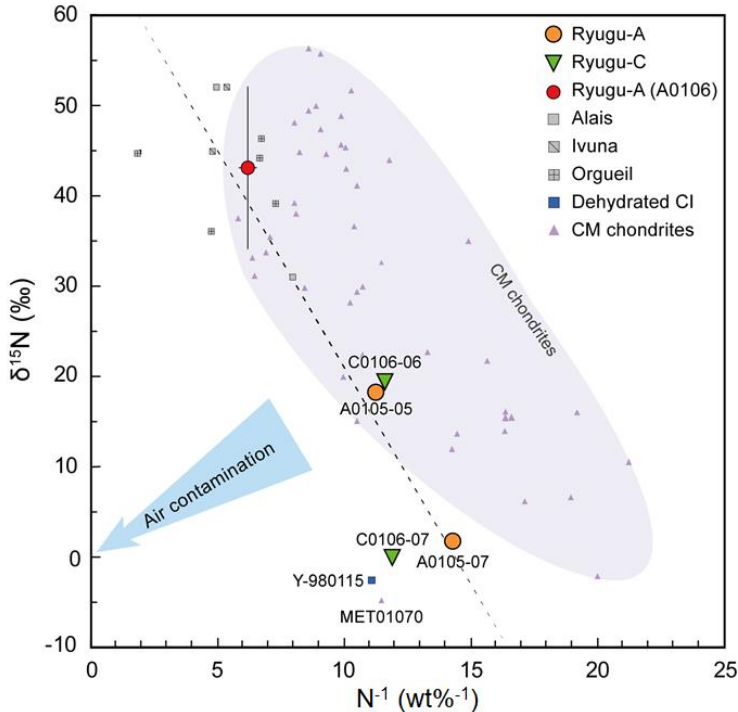


図3:リュウグウ試料の窒素同位体組成(縦軸、地球大気との差を千分率で示したもの)と窒素存在度(重量比)の逆数(横軸)。リュウグウ(オレンジ色丸、緑色逆三角形、赤丸)は試料ごとに窒素組成が異なる。CIコンドライト(灰色および青色四角)、CMコンドライト(紫三角および紫色で囲った領域)も参考のために示している。もしも、地球大気の混入が起きた場合は水色矢印で示した方向に分析データが移動するが、その影響は見えない。

©Okazaki et al., 2022a

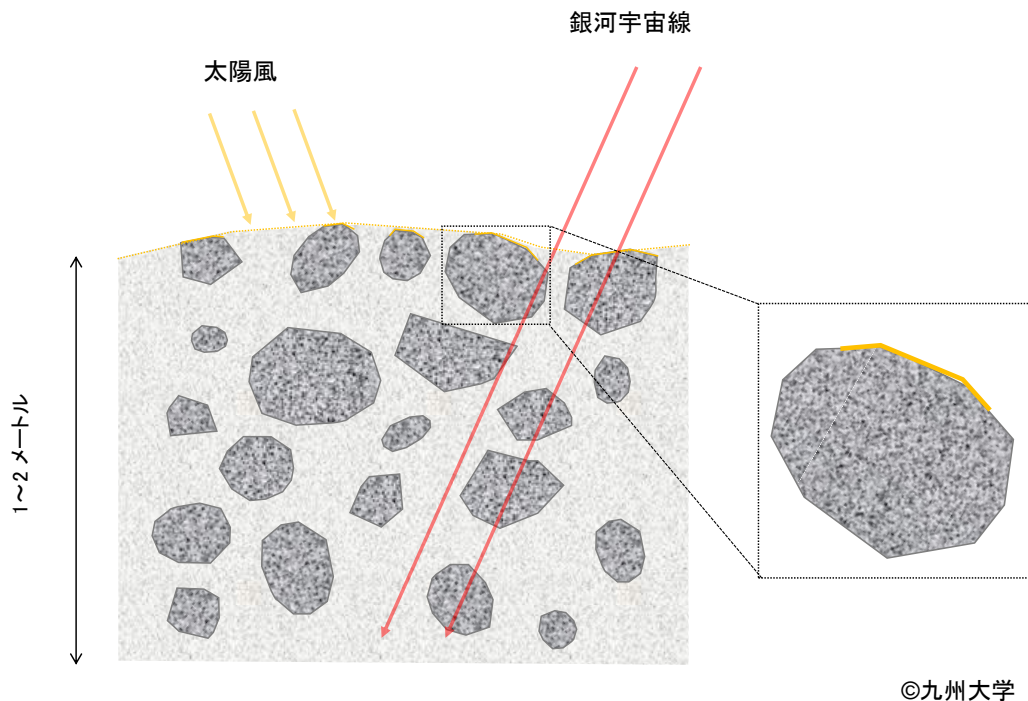
太陽系形成時の始原的ガス以外にも、銀河宇宙線によって生成された希ガスと太陽風起源の2種類の希ガスも含まれていました(図4)。Ryugu-A試料を10個、Ryugu-C試料を6個分析しましたが、太陽風起源のヘリウムやネオンはRyugu-A試料の2個にのみ大量に含まれていることがわかりました。これら2粒子の太陽風照射期間は現在の軌道でそれぞれ3500年間、250年間と計算されました。この照射期間はイトカワ粒子や月レゴリス粒子より短く、太陽風照射履歴をもつ粒子の頻度は極めて低いものです。一方、多くのリュウグウ粒子に含まれていた太陽風起源の希ガス量はわずかであり、それらの粒子の太陽風照射期間は数十年以下であることがわかりました。このことから、回収したリュウグウ表層物質の多くは数十年程度の短期間しか天体の最表面に滞在できなかったことがわかりました。太陽風希ガスを大量に含む粒子はRyugu-A試料にしか見つかっておらず、第2回タッチダウン試料には太陽風希ガスがあまり含まれていないことから、深さ1-2m程度の地下物質はあまり攪拌されていないことがわかりました。

さらに、Ryugu-A試料(10個)、Ryugu-C(6個)試料について、銀河宇宙線の照射によって生成されたネオン量の平均値を求めました。また、Ryugu-Aは表層から約2-4cm、Ryugu-Cは約1.3mの深さでの宇宙線によるネオンの生成速度を求めました。これらを使って計算した結果、どちらの試料も宇宙線照射期間は約500万年であることが判明しました。太陽風希ガスの結果と合わせて考えると、リュウグウ表層から深さ1-2mの領域は隕石衝突などで頻繁には攪拌されていなかったと考えられます。また、現在のリュウグウ表面のクレーターの数密度と近地球軌道での衝突頻度から計算されるクレーター年代は200万年から800万年と求められており、これによく一致しています。小惑星帯での頻繁な隕石衝突によってクレーターが作られたと仮定して計算されるクレーター年代では、10万年から30万年となり、過去500万年間、隕石衝突が頻繁ではなかったことがわかった本分析結果とは合いません。したがって、リュウグウ

が小惑星帯から現在の近地球軌道に移動したタイミングは今から約500万年前であると考えられます(図1)。

また、銀河宇宙線照射によって生成されたネオンと太陽風起源のネオンは、試料を100度に加熱するだけで遊離されることがわかりました。遊離した銀河宇宙線起源ネオンの量から、過去100万年間、リュウグウ表層物質は100°C以上には加熱されていないことがわかりました。すでに表層物質の経験した温度は他の研究でも見積もられており、それと整合的です。今回の研究では温度情報に加えて、年代情報も得ることができました。リュウグウ表層の中緯度域には可視分光で赤く見える物質が見つっています。赤い物質はリュウグウが太陽に一時期近づいたために強い加熱を受けたためにできたという可能性がこれまでの研究で議論されています。もし、赤化の原因が太陽近傍での加熱であるなら、それは100万以上前の出来事であったということを示しています(図1)。

「はやぶさ2」では世界で初めて小惑星表面に人工クレーターを形成し、小惑星地下物質を回収することができました。小惑星最表層物質と地下物質の太陽風起源希ガス含有量を比較・議論することで、初めて両者の天体表層での進化の歴史が異なることを見出すことができました。



©九州大学

図4: 小惑星表層での太陽風(オレンジ色)と銀河宇宙線照射(赤色)。太陽風は物質のごく表面100nmまでしか到達しない。銀河宇宙線は1-2mの深さにまで影響を及ぼす。

3.論文情報

雑誌名: Science

論文タイトル: Noble gases and nitrogen in samples of asteroid Ryugu record its volatile sources and recent surface evolution

著者: R. Okazaki¹, B. Marty², H. Busemann³, K. Hashizume⁴, J.D. Gilmour⁵, A. Meshik⁶, T. Yada⁷, F. Kitajima¹, M.W. Broadley², D. Byrne², E. Füri², M.E.I. Riebe³, D. Krietsch³, C. Maden³, A. Ishida⁸, P. Clay⁵, S.A. Crowther⁵, L. Fawcett⁵, T. Lawton⁵, O. Pravdivtseva⁶, Y.N. Miura⁹, J. Park^{10,11}, K. Bajo¹², Y. Takano¹³, K. Yamada¹⁴, S. Kawagucci^{15,16}, Y. Matsui^{15,16}, M. Yamamoto¹, K. Righter¹⁷, S. Sakai¹³, N. Iwata¹⁸, N.

Shirai^{19,20}, S. Sekimoto²¹, M. Inagaki²¹, M. Ebihara¹⁹, R. Yokochi²², K. Nishiizumi²³, K. Nagao²⁴, J.I. Lee²⁴, A. Kano²⁵, M.W. Caffee^{26,27}, R. Uemura²⁸, T. Nakamura⁸, H. Naraoka¹, T. Noguchi²⁹, H. Yabuta³⁰, H. Yurimoto¹², S. Tachibana³¹, H. Sawada⁷, K. Sakamoto⁷, M. Abe^{7,32}, M. Arakawa³³, A. Fujii⁷, M. Hayakawa⁷, N. Hirata³³, N. Hirata³⁴, R. Honda³⁵, C. Honda³⁴, S. Hosoda⁷, Y. Iijima^{7†}, H. Ikeda⁷, M. Ishiguro³⁶, Y. Ishihara³⁷, T. Iwata⁷, K. Kawahara⁷, S. Kikuchi^{38,39}, K. Kitazato³⁴, K. Matsumoto^{32,39}, M. Matsuoka⁴⁰, T. Michikami⁴¹, Y. Mimasu⁷, A. Miura⁷, T. Morota²⁵, S. Nakazawa⁷, N. Namiki^{32,39}, H. Noda^{32,39}, R. Noguchi⁴², N. Ogawa⁷, K. Ogawa³⁷, T. Okada^{7,43}, C. Okamoto^{33†}, G. Ono⁴⁴, M. Ozaki^{7,32}, T. Saiki^{7,32}, N. Sakatani⁴⁵, H. Senshu³⁸, Y. Shimaki⁷, K. Shirai^{7,33}, S. Sugita²⁵, Y. Takei⁷, H. Takeuchi⁷, S. Tanaka⁷, E. Tatsumi^{25,46}, F. Terui⁴⁷, R. Tsukizaki⁷, K. Wada³⁸, M. Yamada³⁸, T. Yamada⁷, Y. Yamamoto⁷, H. Yano^{7,32}, Y. Yokota⁷, K. Yoshihara⁷, M. Yoshikawa^{7,32}, K. Yoshikawa⁷, S. Furuya⁷, K. Hatakeda⁴⁸, T. Hayashi⁷, Y. Hitomi⁴⁸, K. Kumagai⁴⁸, A. Miyazaki⁷, A. Nakato⁷, M. Nishimura⁷, H. Soejima⁴⁸, A. Iwamae⁴⁸, D. Yamamoto^{7,49}, K. Yogata⁷, M. Yoshitake⁷, R. Fukai⁷, T. Usui⁷, H.C. Connolly Jr.⁵⁰, D. Lauretta⁵¹, S. Watanabe²⁸, Y. Tsuda⁷

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, Fukuoka, 819-0395, Japan.

²Université de Lorraine, CNRS, CRPG, F-54000 Nancy, France.

³Institute of Geochemistry and Petrology, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, 8092 Zürich, Switzerland.

⁴Faculty of Science, Ibaraki University, Mito, 310-8512, Japan.

⁵Department of Earth and Environmental Sciences, The University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK.

⁶Physics Department, Washington University, Saint Louis, MO, 63130, USA.

⁷Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagamihara, 252-5210, Japan.

⁸Department of Earth Science, Tohoku University, Sendai, 980-8578, Japan.

⁹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Tokyo, 113-0032, Japan.

¹⁰Physical Sciences, Kingsborough Community College, The City University of New York, Brooklyn, NY, 11235, USA.

¹¹Department of Earth and Planetary Sciences, American Museum of Natural History, NY, 10024, USA.

¹²Department of Earth and Planetary Sciences, Hokkaido University, Sapporo, 060-0810, Japan.

¹³Biogeochemistry Research Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokosuka, 237-0061, Japan.

¹⁴Department of Chemical Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, 226-8503, Japan.

¹⁵Research Institute for Global Change, JAMSTEC, Yokosuka, 237-0061, Japan.

¹⁶Institute for Extra-cutting-edge Science and Technology Avant-garde Research (X-star), JAMSTEC, Yokosuka, 237-0061, Japan.

¹⁷Astromaterials Research and Exploration Science, Mailcode XI2, National Aeronautics and Space Administration (NASA) Johnson Space Center, Houston, TX, 77058, USA.

¹⁸Faculty of Science, Yamagata University, Yamagata, 990-8560, Japan.

¹⁹Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Metropolitan University, Hachioji, 192-0397, Japan.

²⁰Department of Chemistry, Faculty of Science, Kanagawa University, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1293, Japan.

²¹Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University, Osaka, 590-0494, Japan.

²²Department of the Geophysical Sciences, The University of Chicago, Chicago IL, USA.

²³Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, CA, 94720, USA.

²⁴Division of Earth Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, 21990, Korea.

²⁵School of Science, The University of Tokyo, Tokyo, 113-0033, Japan.

- ²⁶Department of Physics and Astronomy, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA.
- ²⁷Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA.
- ²⁸Department of Earth and Environmental Sciences, Nagoya University, Nagoya, 464-8601, Japan.
- ²⁹Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, Kyoto, 606-8502, Japan.
- ³⁰Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, 739-8526, Japan.
- ³¹UTokyo Organization for Planetary and Space Science, The University of Tokyo, Tokyo, 113-0033, Japan.
- ³²Department of Space and Astronautical Science, The Graduate University for Advanced Studies, Hayama 240-0193, Japan.
- ³³Department of Planetology, Kobe University, Kobe, 657-8501, Japan.
- ³⁴Aizu Research Cluster for Space Science, University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, 965-8580, Japan.
- ³⁵Center of Data Science, Ehime University, Matsuyama, 790-8577, Japan.
- ³⁶Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul, 08826, Republic of Korea.
- ³⁷JAXA Space Exploration Center, JAXA, Sagamihara, 252-5210, Japan.
- ³⁸Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, Narashino, 275-0016, Japan.
- ³⁹National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, 181-8588, Japan.
- ⁴⁰Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Ibaraki, 305-8567, Japan.
- ⁴¹Faculty of Engineering, Kindai University, Higashi-Hiroshima, 739-2116, Japan.
- ⁴²Faculty of Science, Niigata University, Niigata, 950-2181, Japan.
- ⁴³Department of Chemistry, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
- ⁴⁴Research and Development Directorate, JAXA, Sagamihara, 252-5210, Japan.
- ⁴⁵Department of Physics, Rikkyo University, Tokyo, 171-8501, Japan.
- ⁴⁶Instituto de Astrofísica de Canarias, University of La Laguna, Tenerife, Spain.
- ⁴⁷Department of Mechanical Engineering, Kanagawa Institute of Technology, Atsugi, 243-0292, Japan.
- ⁴⁸Marine Works Japan Ltd., Yokosuka, 237-0063, Japan.
- ⁴⁹Department of Earth and Planetary Science, Tokyo Institute of Technology, Ookayama, Tokyo, 152-8550, Japan.
- ⁵⁰Department of Geology, School of Earth and Environment, Rowan University, Glassboro, NJ, 08028, USA.
- ⁵¹Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, AZ, 85705, USA.

† Deceased.

DOI 番号: 10.1126/science.abo0431