

国立研究開発法人
宇宙航空研究開発機構
国立大学法人 北海道大学
国立大学法人 東京工業大学
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 九州大学
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 化学分析チーム 研究成果の科学誌「Science」論文掲載について

小惑星探査機「はやぶさ2」プロジェクトチーム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」及び、岡山大学並びに国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)高知コア研究所の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「化学分析チーム」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6月10日付で掲載されましたのでお知らせします。

タイトル:リュウグウはイヴナ型炭素質隕石でできている

原 題: Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites

掲 載 誌: Science

D O I: 10.1126/science.abn7850

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、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(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、岡山大学およびJAMSTEC高知コア研究所の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を生かし、総合分析フローに基づいて試料のカタログを作成し、試料の特性に応じた測定・分析により、試料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、岡山大学およびJAMSTEC高知コア研究所のチームからの報告は、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

【別紙】

リュウグウはイヴナ型炭素質隕石でできている
Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type
carbonaceous meteorites

1.概要

「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星リュウグウ試料の化学組成と同位体組成を測定しました。リュウグウは炭素質隕石、特に CI コンドライトと呼ばれるイヴナ型炭素質隕石から主に構成されていることが判明しました。その主な構成鉱物は、リュウグウの母天体中で水溶液から析出した二次鉱物です。母天体中の水溶液は、リュウグウに元々あった一次鉱物を変質させ、太陽系が誕生してから約 500 万年後に、この二次鉱物を沈積させました。その時の温度は、約 40°Cで圧力は 0.06 気圧以上でした。その後、今日まで、持ち帰ったリュウグウ試料は 100°C以上に加熱されていないと思われます。これらの結果から、リュウグウ試料は、これまで見つかった隕石を含め、人類が手に入れている天然試料のどれよりも、化学組成的に分化をしていない、最も始原始的な特徴を持っているものと言えます。今後、リュウグウ試料は、新しい太陽系の標準試料として国際的に活用されていくでしょう。

2.本文

小惑星はどんな物質からできているかは未だよくわかっていません。「はやぶさ」は S 型小惑星が普通隕石からできていることを明らかにし、小惑星と隕石との直接の関係性を初めて実証しました。この成果を発展させるため、「はやぶさ2」は C 型小惑星と隕石との関係性を明らかにするため小惑星リュウグウのサンプルリターンを行いました。本論文は、実施された一連の初期分析の最初の報告です。

本論文では、リュウグウの (1) 化学組成、(2) 同位体組成、(3) 構成物質の成因、(4) 構成物質の年代、(5) 隕石との関係性を研究しました。その研究分野が広範囲にわたるために、「はやぶさ2」プロジェクトチームと宇宙物質キュレーションチームの他に、世界中の著名な研究者を加えた国際チームの共同研究となっています。

化学組成分析には、蛍光X線分析、放射光、ICP 質量分析、走査電子顕微鏡を用いました。同位体分析には、ICP 質量分析、表面電離型質量分析、二次イオン質量分析を用いました。分析に用いたリュウグウ試料の形態は、粉体、粒状、研磨片、化学処理した液状のものを用いています。

化学組成は、66 元素(H, Li, Be, C, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U)について分析値を決定しました。リュウグウ試料は Ta(タンタル)に汚染されていることが判明しました。原因はサンプリング時に用いたタンタル製弾丸によるもので、想定されていたものであり、弾丸が正常に発射されたことを証明しています。その他の元素については汚染が認められておらず、非常にクリーンな状態で試料が取り扱われていることを示します。

各元素の分析値を CI コンドライトの値で規格化した図を図 1 に示します。各元素のばらつきは、各分析に用いることができた試料量(約 30mg)が小さかったための試料間の不均一性のためです。この不均一性を考慮すると、その平均値は、全元素に渡りほぼ水平線の上に乗っており、CI コンドライトと同じ濃度比を持っていることを示します。水平線の位置が 1.0 より少し上方なのは、水素(H)のプロットが下方にあるため(理由は後述)です。

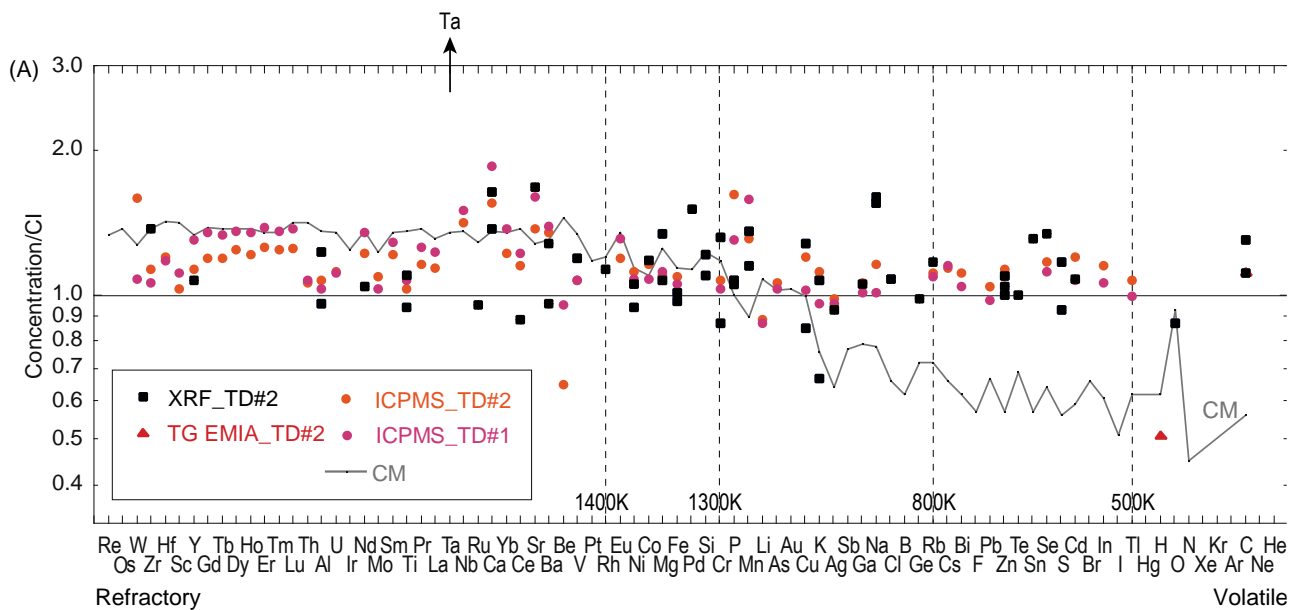
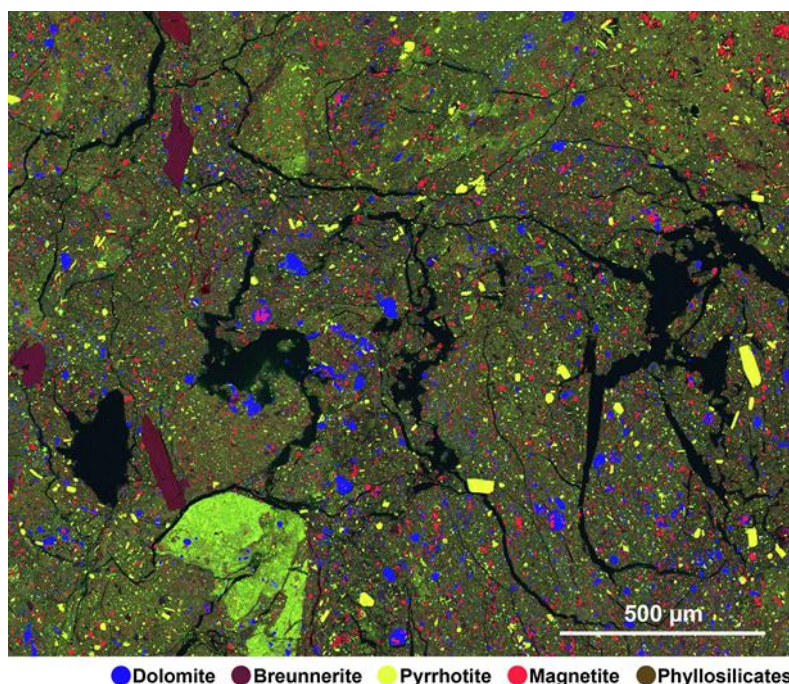


図 1: リュウグウ試料の元素存在度。CI コンドライトの分析値で規格化している。1.0 より上(下)の点は CI コンドライトより多量(少量)に含まれる元素。(©Yokoyama et al., 2022 より)

CI コンドライトの化学組成比は、太陽系全体の化学組成比と等しいと考えられているため、リュウグウは形成以来太陽系全体の化学組成をそのまま保った最も始原的な天体と言えます。

リュウグウ試料の Ti 同位体比、Cr 同位体比、O 同位体比も CI コンドライトと似ているということも示されました。他の元素の同位体比がどうなっているかは、今後の発表を期待してください。

リュウグウ試料の走査電子顕微鏡による分析イメージを図 2 に示します。リュウグウは主に、層状ケイ酸塩(蛇紋石 $(\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ・サポナイト $\text{Ca}_{0.25}(\text{Mg,Fe})_3((\text{Si,Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$) からできています。その他の主要な鉱物は苦灰石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 、プロイネル石 $(\text{Mg,Fe})\text{CO}_3$ 、磁硫鉄鉱 Fe_{1-x}S 、磁鉄鉱 Fe_3O_4 です。これらの鉱物はすべて水溶液からの析出物です。リュウグウの母天体内部では、氷が溶けた水溶液により一次鉱物が分解して、これらの二次鉱物に変わりました。この現象を水質変成作用と呼びます。リュウグウ母天体内部では水質変成作用が強く起こり、一次鉱物はほとんど残りませんでした。これも CI コンドライトとよく似ています。



● Dolomite ● Brunnerite ● Pyrrhotite ● Magnetite ● Phyllosilicates

図 2:リュウグウ試料の構成鉱物。この図上で認識できる鉱物はすべてリュウグウの母天体上で水質変成によりできた二次鉱物。(©Yokoyama et al., 2022 より)

水質変成が起こった年代と温度を Mn-Cr 年代測定法と酸素同位体温度計により決定しました。太陽系誕生の後、約 500 万年たった頃、水質変成が発達し、二次鉱物を析出しました。この時の温度は約 40°C です。圧力の下限は 0.06 気圧です。

その後、隕石母天体から現在の小惑星リュウグウが形成されました。水質変成以後、現在に至るまで、リュウグウ試料は 100°C 以上に加熱されていないようです。しかし、層状ケイ酸塩の層間に含まれていた層間水のほとんどは宇宙空間に蒸発してしまいました。この点が、リュウグウ試料が CI コンドライトと大きく異なる点です。CI コンドライトに含まれている水分の約半分は地球上の水蒸気の汚染の結果なのかもしれません。もしそうならば、CI コンドライトを構成する物質は、有機物を含め、宇宙にいた時の状態と大きく変化しているかもしれません。今後の研究に重要な観点です。

以上の結果より、リュウグウ試料は CI コンドライトによく似ていることがわかりました。CI コンドライトは地球に存在する数万個の隕石の中でも数個しかありません。とても希少な存在の隕石が太陽系に多く存在する C 型小惑星から来ていたのです。しかも、リュウグウは CI コンドライトよりもっと化学的に始原的な特徴を保持しています。したがって、リュウグウ試料は、我々人類が手にしているどの天然試料よりも化学的に太陽系の平均組成に近い始原性をもつ試料と言えます。今後、リュウグウ試料は、新しい太陽系の標準試料として国際的に活用されていくでしょう。

3.論文情報

論文タイトル:

Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites

著者名:

Tetsuya Yokoyama^{1†}, Kazuhide Nagashima^{2†}, Izumi Nakai³, Edward D. Young⁴, Yoshinari Abe⁵, Jérôme Aléon⁶, Conel M. O'D. Alexander⁷, Sachiko Amari⁸, Yuri Amelin⁹, Ken-ichi Bajo¹⁰, Martin Bizzarro¹¹, Audrey Bouvier¹², Richard W. Carlson⁷, Marc Chaussidon¹³, Byeon-Gak Choi¹⁴, Nicolas Dauphas¹⁵, Andrew M. Davis¹⁵, Tommaso Di Rocco¹⁶, Wataru Fujiya¹⁷, Ryota Fukai¹⁸, Ikshu Gautam¹, Makiko K. Haba¹, Yuki Hibiya¹⁹, Hiroshi Hidaka²⁰, Hisashi Homma²¹, Peter Hoppe²², Gary R. Huss², Kiyohiro Ichida²³, Tsuyoshi Iizuka²⁴, Trevor R. Ireland²⁵, Akira Ishikawa¹, Motoo Ito²⁶, Shoichi Itoh²⁷, Noriyuki Kawasaki¹⁰, Noriko T. Kita²⁸, Kouki Kitajima²⁸, Thorsten Kleine²⁹, Shintaro Komatani²³, Alexander N. Krot², Ming-Chang Liu⁴, Yuki Masuda¹, Kevin D. McKeegan⁴, Mayu Morita²³, Kazuko Motomura³⁰, Frédéric Moynier¹³, Ann Nguyen³¹, Larry Nittler⁷, Morihiko Onose²³, Andreas Pack¹⁶, Changkun Park³², Laurette Piani³³, Liping Qin³⁴, Sara S. Russell³⁵, Naoya Sakamoto³⁶, Maria Schönbächler³⁷, Lauren Tafra⁴, Haolan Tang⁴, Kentaro Terada³⁸, Yasuko Terada³⁹, Tomohiro Usui¹⁸, Sohei Wada¹⁰, Meenakshi Wadhwa⁴⁰, Richard J. Walker⁴¹, Katsuyuki Yamashita⁴², Qing-Zhu Yin⁴³, Shigekazu Yoneda⁴⁴, Hiroharu Yui⁴⁵, Ai-Cheng Zhang⁴⁶, Harold C. Connolly, Jr.⁴⁷, Dante S. Lauretta⁴⁸, Tomoki Nakamura⁴⁹, Hiroshi Naraoka⁵⁰, Takaaki Noguchi²⁷, Ryuji Okazaki⁵⁰, Kanako Sakamoto¹⁸, Hikaru Yabuta⁵¹, Masanao Abe¹⁸, Masahiko Arakawa⁵², Atsushi Fujii¹⁸, Masahiko Hayakawa¹⁸, Naoyuki Hirata⁵², Naru Hirata⁵³, Rie Honda⁵⁴, Chikatoshi Honda⁵³, Satoshi Hosoda¹⁸, Yu-ichi Iijima^{18†}, Hitoshi Ikeda¹⁸, Masateru Ishiguro¹⁴, Yoshiaki Ishihara¹⁸, Takahiro Iwata^{18,55}, Kosuke Kawahara¹⁸, Shota Kikuchi⁵⁶, Kohei Kitazato⁵³, Koji

Matsumoto⁵⁷, Moe Matsuoka^{18§}, Tatsuhiro Michikami⁵⁸, Yuya Mimasu¹⁸, Akira Miura¹⁸, Tomokatsu Morota²⁴, Satoru Nakazawa¹⁸, Noriyuki Namiki⁵⁷, Hiroto Noda⁵⁷, Rina Noguchi⁵⁹, Naoko Ogawa¹⁸, Kazunori Ogawa¹⁸, Tatsuaki Okada^{18,60}, Chisato Okamoto^{52‡}, Go Ono¹⁸, Masanobu Ozaki^{18,55}, Takanao Saiki¹⁸, Naoya Sakatani⁶¹, Hiroataka Sawada¹⁸, Hiroki Senshu⁵⁶, Yuri Shimaki¹⁸, Kei Shirai¹⁸, Seiji Sugita²⁴, Yuto Takei¹⁸, Hiroshi Takeuchi¹⁸, Satoshi Tanaka¹⁸, Eri Tatsumi⁶², Fuyuto Terui⁶³, Yuichi Tsuda¹⁸, Ryudo Tsukizaki¹⁸, Koji Wada⁵⁶, Sei-ichiro Watanabe²⁰, Manabu Yamada⁵⁶, Tetsuya Yamada¹⁸, Yukio Yamamoto¹⁸, Hajime Yano¹⁸, Yasuhiro Yokota¹⁸, Keisuke Yoshihara¹⁸, Makoto Yoshikawa¹⁸, Kent Yoshikawa¹⁸, Shizuho Furuya¹⁸, Kentaro Hatakeda⁶⁴, Tasuku Hayashi¹⁸, Yuya Hitomi⁶⁴, Kazuya Kumagai⁶⁴, Akiko Miyazaki¹⁸, Aiko Nakato¹⁸, Masahiro Nishimura¹⁸, Hiromichi Soejima⁶⁴, Ayako Suzuki⁶⁴, Toru Yada¹⁸, Daiki Yamamoto¹⁸, Kasumi Yogata¹⁸, Miwa Yoshitake¹⁸, Shogo Tachibana⁶⁵, Hisayoshi Yurimoto^{10,36*}

著者所属:

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology; Tokyo 152-8551, Japan.

²Hawai'i Institute of Geophysics and Planetology, University of Hawai'i at Mānoa; Honolulu, HI 96822, USA.

³Department of Applied Chemistry, Tokyo University of Science; Tokyo 162-8601, Japan.

⁴Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California, Los Angeles; Los Angeles, CA 90095, USA.

⁵Graduate School of Engineering Materials Science and Engineering, Tokyo Denki University; Tokyo 120-8551, Japan.

⁶Institut 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, Institut de recherche pour le développement; 75005 Paris, France.

⁷Earth and Planets Laboratory, Carnegie Institution for Science; Washington, DC, 20015, USA.

⁸McDonnell Center for the Space Sciences and Physics Department, Washington University; St. Louis, MO 63130, USA.

⁹Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences; Guangzhou, GD 510640, China.

¹⁰Department of Natural History Sciences, Hokkaido University; Sapporo 001-0021, Japan.

¹¹Centre for Star and Planet Formation, Globe Institute, University of Copenhagen; Copenhagen, K 1350, Denmark.

¹²Bayerisches Geoinstitut, Universität Bayreuth; Bayreuth 95447, Germany.

¹³Université de Paris, Institut de physique du globe de Paris, Centre National de la Recherche Scientifique; 75005 Paris, France

¹⁴Department of Physics and Astronomy, Seoul National University; Seoul 08826, Republic of Korea.

¹⁵Department of the Geophysical Sciences and Enrico Fermi Institute, The University of Chicago; Chicago, IL 60637, USA.

¹⁶Faculty of Geosciences and Geography, University of Göttingen; Göttingen, D-37077, Germany.

¹⁷Faculty of Science, Ibaraki University; Mito 310-8512, Japan.

¹⁸Institute of Space and Astronautical Science / Jaxa Space Exploration Center, Japan Aerospace Exploration Agency; Sagami-hara 252-5210, Japan.

¹⁹Department of General Systems Studies, The University of Tokyo; Tokyo 153-0041, Japan.

²⁰Department of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University; Nagoya 464-8601, Japan.

²¹Osaka Application Laboratory, Rigaku Corporation; Osaka 569-1146, Japan.

²²Max Planck Institute for Chemistry; Mainz 55128, Germany.

²³Analytical Technology Division, Horiba Techno Service Co., Ltd.; Kyoto 601-8125, Japan.

²⁴Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo; Tokyo 113-0033, Japan.

²⁵School of Earth and Environmental Sciences, The University of Queensland; St Lucia QLD 4072, Australia.

²⁶Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology; Kochi 783-8502, Japan.

²⁷Department of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University; Kyoto 606-8502, Japan.

²⁸Department of Geoscience, University of Wisconsin- Madison; Madison, WI 53706, USA.

²⁹Max Planck Institute for Solar System Research; 37077 Göttingen, Germany.

³⁰Thermal Analysis Division, Rigaku Corporation; Tokyo 196-8666, Japan.

³¹Astromaterials Research and Exploration Science Division, National Aeronautics and Space Administration Johnson Space Center; Houston, TX 77058, USA.

³²Division of Earth-System Sciences, Korea Polar Research Institute; Incheon 21990, Korea.

³³Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Centre National de la Recherche Scientifique - Université de Lorraine; 54500 Nancy, France.

³⁴School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China; Anhui 230026, China.

³⁵Department of Earth Sciences, Natural History Museum; London, SW7 5BD, UK.

³⁶Isotope Imaging Laboratory, Hokkaido University; Sapporo 001-0021, Japan.

³⁷Institute for Geochemistry and Petrology, Department of Earth Sciences, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.

³⁸Department of Earth and Space Science, Osaka University; Osaka 560-0043, Japan.

³⁹Spectroscopy and Imaging Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute; Hyogo 679-5198 Japan.

⁴⁰School of Earth and Space Exploration, Arizona State University; Tempe, AZ 85281, USA.

⁴¹Geology, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA.

⁴²Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University; Okayama 700-8530, Japan.

⁴³Department of Earth and Planetary Sciences, University of California; Davis, CA 95616, USA.

⁴⁴Department of Science and Engineering, National Museum of Nature and Science; Tsukuba 305-0005, Japan.

⁴⁵Department of Chemistry, Tokyo University of Science; Tokyo 162-8601, Japan.

⁴⁶School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University; Nanjing 210023, China.

⁴⁷Department of Geology, School of Earth and Environment, Rowan University; Glassboro, NJ 08028, USA.

⁴⁸Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona; Tucson, AZ 85705, USA.

- ⁴⁹Department of Earth Science, Tohoku University; Sendai, 980-8578, Japan.
- ⁵⁰Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University; Fukuoka 819-0395, Japan.
- ⁵¹Earth and Planetary Systems Science Program, Hiroshima University; Higashi-Hiroshima, 739-8526, Japan.
- ⁵²Graduate School of Science, Kobe University; Kobe 657-8501, Japan.
- ⁵³Department of Computer Science and Engineering, University of Aizu; Aizu-Wakamatsu 965-8580, Japan.
- ⁵⁴Faculty of Science and Technology, Kochi University; Kochi 780-8520, Japan.
- ⁵⁵The Graduate University for Advanced Studies, Sokendai, Kanagawa 240-0193, Japan
- ⁵⁶Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology; Narashino 275-0016, Japan.
- ⁵⁷National Astronomical Observatory of Japan; Mitaka 181-8588, Japan.
- ⁵⁸Faculty of Engineering, Kinki University; Higashi-Hiroshima 739-2116, Japan.
- ⁵⁹Academic Assembly Institute of Science and Technology, Niigata University; Niigata 950-2181, Japan.
- ⁶⁰Department of Chemistry, The University of Tokyo; Tokyo 113-0033, Japan.
- ⁶¹College of Science Department of Physics, Rikkyo University; Tokyo 171-8501, Japan.
- ⁶²Instituto de Astrofísica de Canarias, University of La Laguna; Tenerife, Spain.
- ⁶³Graduate School of Engineering, Kanagawa Institute of Technology; Atsugi 243-0292, Japan.
- ⁶⁴Marine Works Japan Ltd.; Yokosuka 237-0063 Japan.
- ⁶⁵UTokyo Organization for Planetary and Space Science, University of Tokyo; Tokyo 113-0033, Japan.

*Corresponding author. Email: yuri@ep.sci.hokudai.ac.jp

†These authors contributed equally to this work.

‡Deceased.

§Present address. Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique, Observatoire de Paris; 92195 Meudon, France.

掲載誌: Science

D O I: 10.1126/science.abn7850