

## 記者会限定配布

2022年(令和4年)

6月10日(金)

9:30 発表

プレスリリース

2022年(令和4年)6月10日

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

#### 論文掲載

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

DOI: 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

本件内容の問い合わせ先

JAXA 宇宙科学研究所 広報担当	メール: <a href="mailto:isas-kouho@ml.jaxa.jp">isas-kouho@ml.jaxa.jp</a>
北海道大学 社会共創部広報課広報・渉外担当	メール: <a href="mailto:jp-press@general.hokudai.ac.jp">jp-press@general.hokudai.ac.jp</a>
東京工業大学 総務部広報課	メール: <a href="mailto:media@jim.titech.ac.jp">media@jim.titech.ac.jp</a>
東北大学大学院理学研究科 広報・アウトリーチ支援室	メール: <a href="mailto:sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp">sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp</a>
京都大学総務部広報課国際広報室	メール: <a href="mailto:comms@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp">comms@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp</a>
九州大学 広報室	メール: <a href="mailto:koho@jimu.kyushu-u.ac.jp">koho@jimu.kyushu-u.ac.jp</a>
広島大学 広報室	メール: <a href="mailto:koho@office.hiroshima-u.ac.jp">koho@office.hiroshima-u.ac.jp</a>
東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室	メール: <a href="mailto:kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp">kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp</a>

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だと言えます。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。

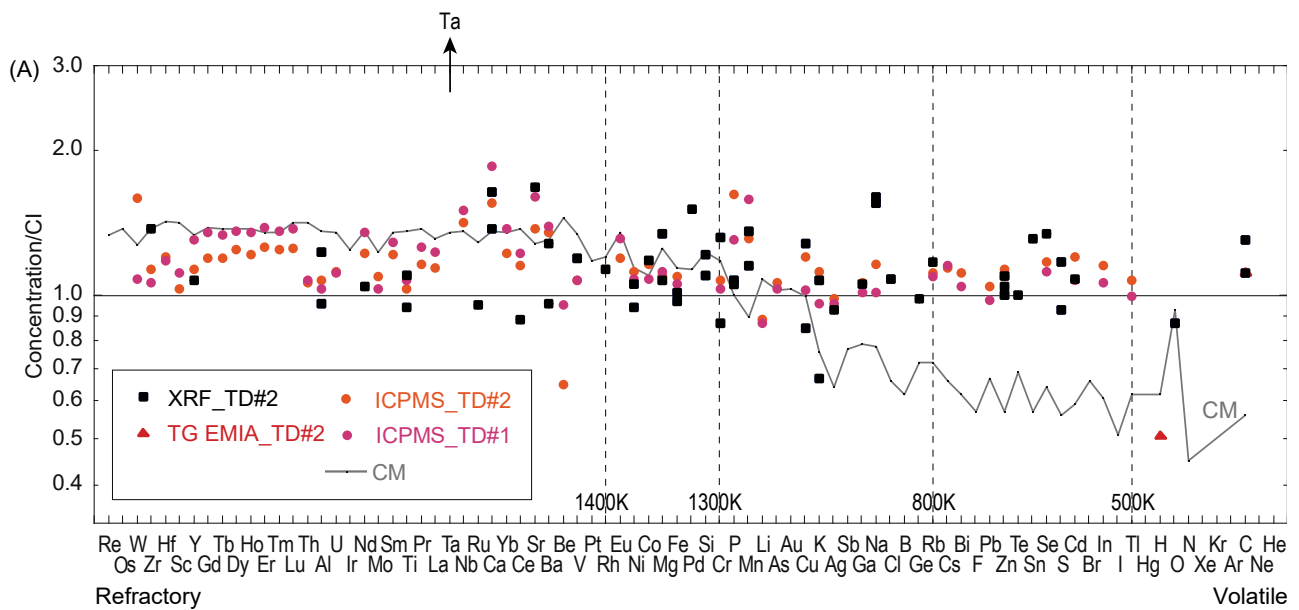
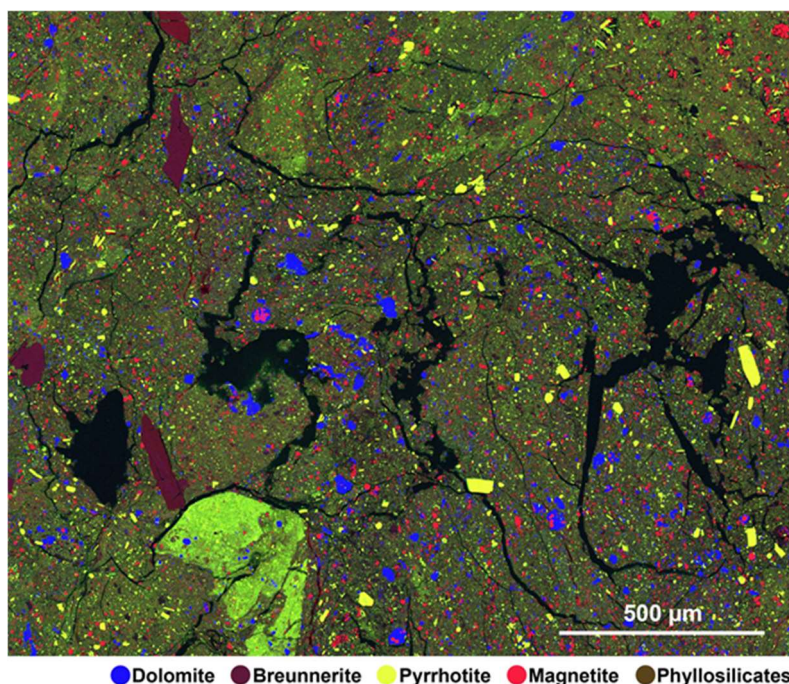


図 1: リュウグウ試料の元素存在度。CIコンドライトの分析値で規格化している。1.0より上(下)の点はCIコンドライトより多量(少量)に含まれる元素。(©Yokoyama et al., 2022 より)

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  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ 、磁鉄鉱  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 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 ● Breunnerite ● 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<sup>1†</sup>, Kazuhide Nagashima<sup>2†</sup>, Izumi Nakai<sup>3</sup>, Edward D. Young<sup>4</sup>, Yoshinari Abe<sup>5</sup>, Jérôme Aléon<sup>6</sup>, Conel M. O'D. Alexander<sup>7</sup>, Sachiko Amari<sup>8</sup>, Yuri Amelin<sup>9</sup>, Ken-ichi Bajo<sup>10</sup>, Martin Bizzarro<sup>11</sup>, Audrey Bouvier<sup>12</sup>, Richard W. Carlson<sup>7</sup>, Marc Chaussidon<sup>13</sup>, Byeon-Gak Choi<sup>14</sup>, Nicolas Dauphas<sup>15</sup>, Andrew M. Davis<sup>15</sup>, Tommaso Di Rocco<sup>16</sup>, Wataru Fujiya<sup>17</sup>, Ryota Fukai<sup>18</sup>, Ikshu Gautam<sup>1</sup>, Makiko K. Haba<sup>1</sup>, Yuki Hibiya<sup>19</sup>, Hiroshi Hidaka<sup>20</sup>, Hisashi Homma<sup>21</sup>, Peter Hoppe<sup>22</sup>, Gary R. Huss<sup>2</sup>, Kiyohiro Ichida<sup>23</sup>, Tsuyoshi Iizuka<sup>24</sup>, Trevor R. Ireland<sup>25</sup>, Akira Ishikawa<sup>1</sup>, Motoo Ito<sup>26</sup>, Shoichi Itoh<sup>27</sup>, Noriyuki Kawasaki<sup>10</sup>, Noriko T. Kita<sup>28</sup>, Kouki Kitajima<sup>28</sup>, Thorsten Kleine<sup>29</sup>, Shintaro Komatani<sup>23</sup>, Alexander N. Krot<sup>2</sup>, Ming-Chang Liu<sup>4</sup>, Yuki Masuda<sup>1</sup>, Kevin D. McKeegan<sup>4</sup>, Mayu Morita<sup>23</sup>, Kazuko Motomura<sup>30</sup>, Frédéric Moynier<sup>13</sup>, Ann Nguyen<sup>31</sup>, Larry Nittler<sup>7</sup>, Morihiko Onose<sup>23</sup>, Andreas Pack<sup>16</sup>, Changkun Park<sup>32</sup>, Laurette Piani<sup>33</sup>, Liping Qin<sup>34</sup>, Sara S. Russell<sup>35</sup>, Naoya Sakamoto<sup>36</sup>, Maria Schönbächler<sup>37</sup>, Lauren Tafla<sup>4</sup>, Haolan Tang<sup>4</sup>, Kentaro Terada<sup>38</sup>, Yasuko Terada<sup>39</sup>, Tomohiro Usui<sup>18</sup>, Sohei Wada<sup>10</sup>, Meenakshi Wadhwa<sup>40</sup>, Richard J. Walker<sup>41</sup>, Katsuyuki Yamashita<sup>42</sup>, Qing-Zhu Yin<sup>43</sup>, Shigekazu Yoneda<sup>44</sup>, Hiroharu Yui<sup>45</sup>, Ai-Cheng Zhang<sup>46</sup>, Harold C. Connolly, Jr.<sup>47</sup>, Dante S. Lauretta<sup>48</sup>, Tomoki Nakamura<sup>49</sup>, Hiroshi Naraoka<sup>50</sup>, Takaaki Noguchi<sup>27</sup>, Ryuji Okazaki<sup>50</sup>, Kanako Sakamoto<sup>18</sup>, Hikaru Yabuta<sup>51</sup>, Masanao Abe<sup>18</sup>, Masahiko Arakawa<sup>52</sup>, Atsushi Fujii<sup>18</sup>, Masahiko Hayakawa<sup>18</sup>, Naoyuki Hirata<sup>52</sup>, Naru Hirata<sup>53</sup>, Rie Honda<sup>54</sup>, Chikatoshi Honda<sup>53</sup>, Satoshi Hosoda<sup>18</sup>, Yu-ichi Iijima<sup>18†</sup>, Hitoshi Ikeda<sup>18</sup>, Masateru Ishiguro<sup>14</sup>, Yoshiaki Ishihara<sup>18</sup>, Takahiro Iwata<sup>18,55</sup>, Kosuke Kawahara<sup>18</sup>, Shota Kikuchi<sup>56</sup>, Kohei Kitazato<sup>53</sup>, Koji

Matsumoto<sup>57</sup>, Moe Matsuoka<sup>18,§</sup>, Tatsuhiro Michikami<sup>58</sup>, Yuya Mimasu<sup>18</sup>, Akira Miura<sup>18</sup>, Tomokatsu Morota<sup>24</sup>, Satoru Nakazawa<sup>18</sup>, Noriyuki Namiki<sup>57</sup>, Hiroto Noda<sup>57</sup>, Rina Noguchi<sup>59</sup>, Naoko Ogawa<sup>18</sup>, Kazunori Ogawa<sup>18</sup>, Tatsuaki Okada<sup>18,60</sup>, Chisato Okamoto<sup>52,‡</sup>, Go Ono<sup>18</sup>, Masanobu Ozaki<sup>18,55</sup>, Takanao Saiki<sup>18</sup>, Naoya Sakatani<sup>61</sup>, Hiroataka Sawada<sup>18</sup>, Hiroki Senshu<sup>56</sup>, Yuri Shimaki<sup>18</sup>, Kei Shirai<sup>18</sup>, Seiji Sugita<sup>24</sup>, Yuto Takei<sup>18</sup>, Hiroshi Takeuchi<sup>18</sup>, Satoshi Tanaka<sup>18</sup>, Eri Tatsumi<sup>62</sup>, Fuyuto Terui<sup>63</sup>, Yuichi Tsuda<sup>18</sup>, Ryudo Tsukizaki<sup>18</sup>, Koji Wada<sup>56</sup>, Sei-ichiro Watanabe<sup>20</sup>, Manabu Yamada<sup>56</sup>, Tetsuya Yamada<sup>18</sup>, Yukio Yamamoto<sup>18</sup>, Hajime Yano<sup>18</sup>, Yasuhiro Yokota<sup>18</sup>, Keisuke Yoshihara<sup>18</sup>, Makoto Yoshikawa<sup>18</sup>, Kent Yoshikawa<sup>18</sup>, Shizuho Furuya<sup>18</sup>, Kentaro Hatakeda<sup>64</sup>, Tasuku Hayashi<sup>18</sup>, Yuya Hitomi<sup>64</sup>, Kazuya Kumagai<sup>64</sup>, Akiko Miyazaki<sup>18</sup>, Aiko Nakato<sup>18</sup>, Masahiro Nishimura<sup>18</sup>, Hiromichi Soejima<sup>64</sup>, Ayako Suzuki<sup>64</sup>, Toru Yada<sup>18</sup>, Daiki Yamamoto<sup>18</sup>, Kasumi Yogata<sup>18</sup>, Miwa Yoshitake<sup>18</sup>, Shogo Tachibana<sup>65</sup>, Hisayoshi Yurimoto<sup>10,36\*</sup>

著者所属:

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

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

<sup>3</sup>Department of Applied Chemistry, Tokyo University of Science; Tokyo 162-8601, Japan.

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

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

<sup>6</sup>Institut 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.

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

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

<sup>9</sup>Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences; Guangzhou, GD 510640, China.

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

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

<sup>12</sup>Bayerisches Geoinstitut, Universität Bayreuth; Bayreuth 95447, Germany.

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

<sup>14</sup>Department of Physics and Astronomy, Seoul National University; Seoul 08826, Republic of Korea.

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

<sup>16</sup>Faculty of Geosciences and Geography, University of Göttingen; Göttingen, D-37077, Germany.

<sup>17</sup>Faculty of Science, Ibaraki University; Mito 310-8512, Japan.

- <sup>18</sup>Institute of Space and Astronautical Science / Jaxa Space Exploration Center, Japan Aerospace Exploration Agency; Sagami-hara 252-5210, Japan.
- <sup>19</sup>Department of General Systems Studies, The University of Tokyo; Tokyo 153-0041, Japan.
- <sup>20</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University; Nagoya 464-8601, Japan.
- <sup>21</sup>Osaka Application Laboratory, Rigaku Corporation; Osaka 569-1146, Japan.
- <sup>22</sup>Max Planck Institute for Chemistry; Mainz 55128, Germany.
- <sup>23</sup>Analytical Technology Division, Horiba Techno Service Co., Ltd.; Kyoto 601-8125, Japan.
- <sup>24</sup>Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo; Tokyo 113-0033, Japan.
- <sup>25</sup>School of Earth and Environmental Sciences, The University of Queensland; St Lucia QLD 4072, Australia.
- <sup>26</sup>Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology; Kochi 783-8502, Japan.
- <sup>27</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University; Kyoto 606-8502, Japan.
- <sup>28</sup>Department of Geoscience, University of Wisconsin- Madison; Madison, WI 53706, USA.
- <sup>29</sup>Max Planck Institute for Solar System Research; 37077 Göttingen, Germany.
- <sup>30</sup>Thermal Analysis Division, Rigaku Corporation; Tokyo 196-8666, Japan.
- <sup>31</sup>Astromaterials Research and Exploration Science Division, National Aeronautics and Space Administration Johnson Space Center; Houston, TX 77058, USA.
- <sup>32</sup>Division of Earth-System Sciences, Korea Polar Research Institute; Incheon 21990, Korea.
- <sup>33</sup>Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Centre National de la Recherche Scientifique - Université de Lorraine; 54500 Nancy, France.
- <sup>34</sup>School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China; Anhui 230026, China.
- <sup>35</sup>Department of Earth Sciences, Natural History Museum; London, SW7 5BD, UK.
- <sup>36</sup>Isotope Imaging Laboratory, Hokkaido University; Sapporo 001-0021, Japan.
- <sup>37</sup>Institute for Geochemistry and Petrology, Department of Earth Sciences, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.
- <sup>38</sup>Department of Earth and Space Science, Osaka University; Osaka 560-0043, Japan.
- <sup>39</sup>Spectroscopy and Imaging Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute; Hyogo 679-5198 Japan.
- <sup>40</sup>School of Earth and Space Exploration, Arizona State University; Tempe, AZ 85281, USA.
- <sup>41</sup>Geology, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA.
- <sup>42</sup>Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University; Okayama 700-8530, Japan.
- <sup>43</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, University of California; Davis, CA 95616, USA.
- <sup>44</sup>Department of Science and Engineering, National Museum of Nature and Science; Tsukuba 305-0005, Japan.
- <sup>45</sup>Department of Chemistry, Tokyo University of Science; Tokyo 162-8601, Japan.
- <sup>46</sup>School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University; Nanjing 210023, China.
- <sup>47</sup>Department of Geology, School of Earth and Environment, Rowan University; Glassboro, NJ 08028, USA.
- <sup>48</sup>Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona; Tucson, AZ 85705, USA.

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

\*Corresponding author. Email: [yuri@ep.sci.hokudai.ac.jp](mailto: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