



報道機関 各位

千葉工業大学

## 小惑星探査機「はやぶさ2」初期分析 石の分析チームに千葉工業大学の研究者が貢献

### <概要>

- JAXA、東北大学は、はやぶさ2が持ち帰ったリュウグウの石の初期分析結果を科学誌「*Science*」に発表した。
- 千葉工業大学 惑星探査研究センターの研究者が物性計測とリュウグウ形成史の解明に貢献した。
- リュウグウの石の強度を計測した。リュウグウの石はカミソリで切り取れるほど柔らかいことがわかった。
- リュウグウ母天体が破壊された衝突のときに発生する温度、圧力を数値衝突計算で明らかにした。

東北大学理学研究科 中村智樹 教授が率いるはやぶさ2 初期分析「石の物質分析チーム」は、探査機はやぶさ2が持ち帰った炭素質小惑星リュウグウ試料中でも大きさが1mmを超える「石」の分析結果を発表しました。成果の詳細は9月22日(木)(日本時間9月23日(金)午前3時)にアメリカ科学振興協会(AAAS)サイエンス(*Science*)誌に掲載され、概要はJAXA、東北大学からの以下のプレスリリースとしてまとめられています。

JAXA、東北大学プレスリリース

小惑星探査機「はやぶさ2」初期分析 石の物質分析チーム 研究成果の科学誌「*Science*」論文掲載について

[https://www.jaxa.jp/press/2022/09/20220923-1\\_i.html](https://www.jaxa.jp/press/2022/09/20220923-1_i.html)

千葉工業大学 惑星探査研究センターの黒澤耕介 上席研究員はリュウグウ試料初期分析「石」チームに参加しました。黒澤 上席研究員は JAXA の田中智 教授が率いる物性計測サブチーム、東京工業大学の玄田英典 教授が率いるシミュレーションサブチームに貢献し、全著者221名の中で19名の主要貢献者に選出されています。

黒澤 上席研究員と田中智 教授はリュウグウの石の強度を測る試験を行いました(図1)。岩石の強度はその岩石の生成環境によって変化する基本的な物性の一つです。試験の前にはリュウグウの石の強度についての情報に乏しかったため、確実に強度の情報を得ることができる「3点曲げ試験法」(※注1)を採用しました。試料の大きさに合わせた治具は千葉工業大学の工作センターにて製作されました。その結果、リュウグウの石の強度は地球上の岩石の中では比較的脆い大理石のそれに近く、火成岩に比べて数分の一程度であることがわかりました。

物性計測サブチームでは他にもリュウグウの石についての様々なデータを取得しました。シミュレーションサブチームはこれらの物性データを基にリュウグウの歴史の再現シミュレーションを実施しました(注2)。黒澤 上席研究員は玄田 教授とともに物性計測サブチームが取得したリュウグウ岩石のデータをもとにリュウグウの状態方程式モデル(※注3)を作成しました。このことでリュウグウの母天体が過去の天体衝突で破壊された際の温度、圧力上昇度を調べるのが可能になりました(図2)。現在のリュウグウのもとになった天体は直径100kmほどの天体であったと推定されており、およそ8億年前に大規模な天体衝突で破壊されたと考えられています。このときに飛び散ったかけらが現在のリュウグウです。計算の結果、高温、高圧を経験する物質は衝突点の近傍数10kmに限られることがわかりました。リュウグウの石の鉱物学的分析からは衝撃の痕跡が見いだされなかったことから、リュウグウのもとになった岩体がリュウグウ母天体の中で衝突点から遠方にあったことがわかりました。

本論文にはリュウグウ近傍観測チームメンバーである千葉工業大学 惑星探査研究センターの山田学 上席研究員、和田浩二 主席研究員、千秋博紀 主席研究員、菊地翔太 学術振興会特別研究員（当時、現 国立天文台 RISE 月惑星探査プロジェクト助教）、杉田精司 客員主席研究員（東京大学 大学院理学系研究科教授）も参加しています。

<図>

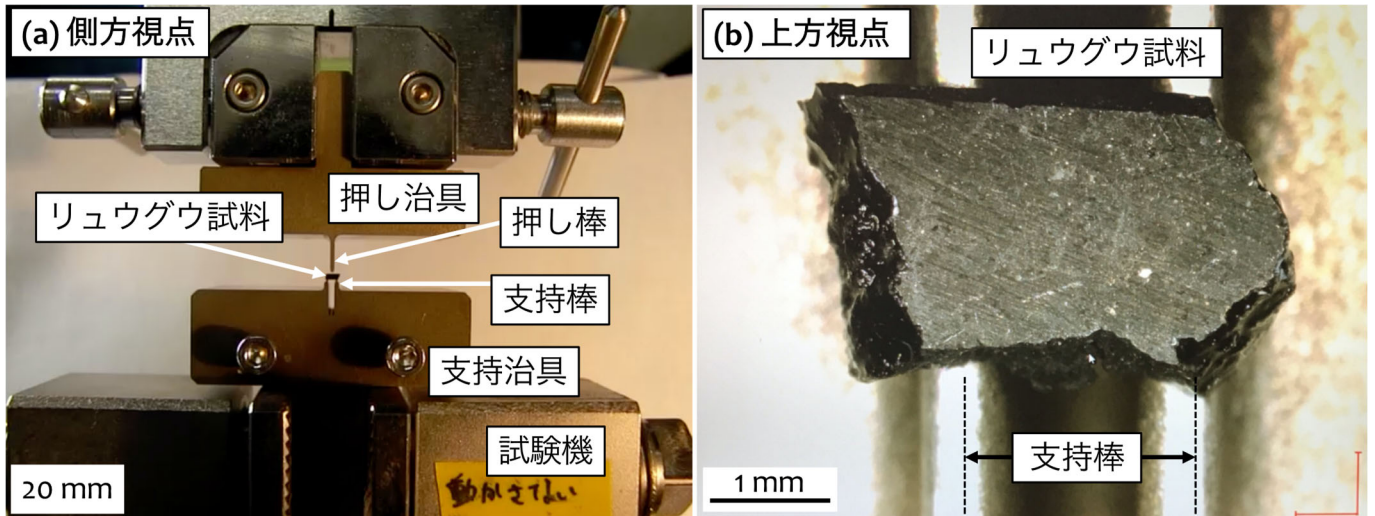


図 1. リュウグウの石の強度計測の様子。試験は宇宙科学研究所で行われました。試料が数 mm と小さいため専用の治具を設計、製作しました。なお試料の実物大レプリカと、本試験に使用された治具の複製は千葉工業大学 東京スカイツリータウン®キャンパスにて 2022 年 9 月 27 日より公開されます。

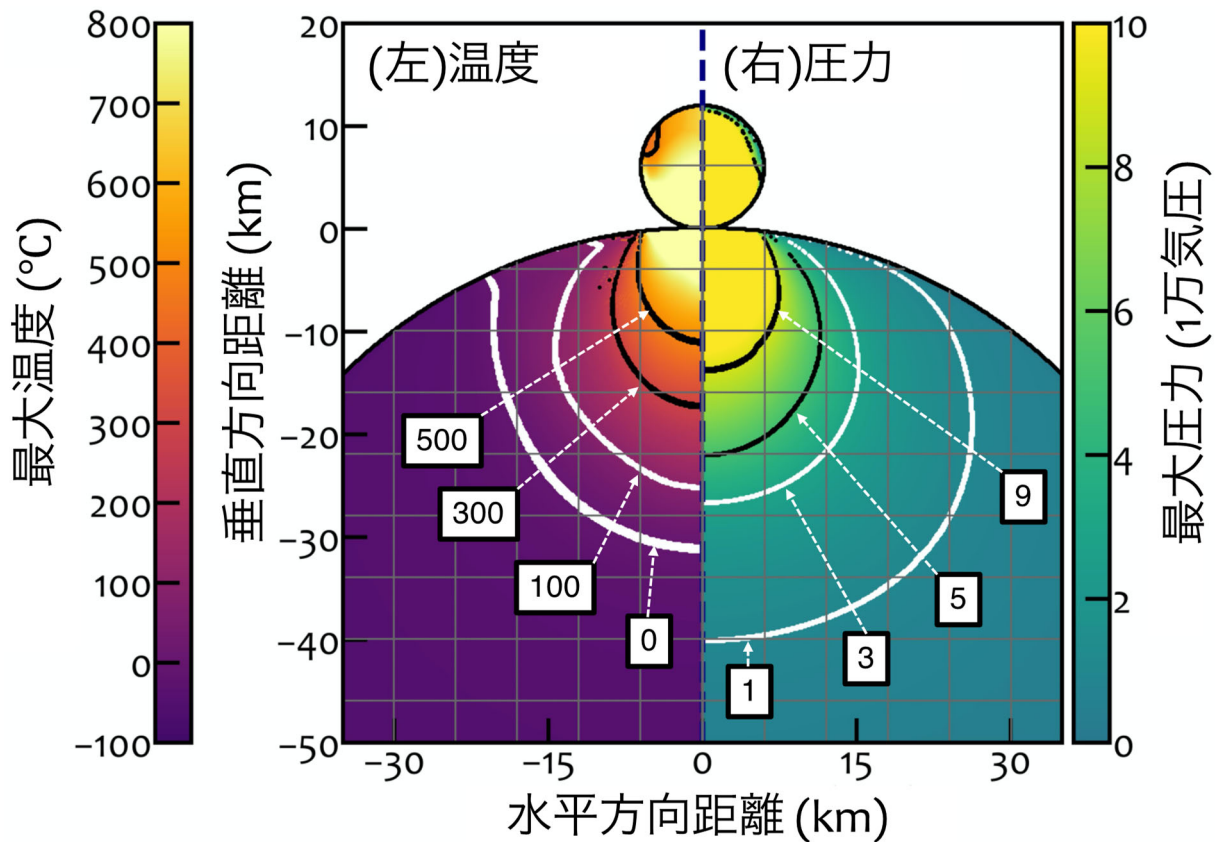


図 2. リュウグウ母天体の破壊計算例。計算中に達成された最大温度(左)、最大圧力(右)を初期位置に対して表示しています。図中の白黒線は温度、圧力の等値線です。図中の格子状の線は衝突天体の半径の間隔で配置しています。衝突天体の大きさはシミュレーションサブチームに所属する宇宙科学研究所の兵頭龍樹 国際トップヤングフェロー、東京工業大学の玄田英典 教授による別の数値衝突計算によって決定されました。衝突速度は小惑星帯における典型的な衝突速度である秒速 5

km に設定しました。詳細な鉱物学的観察結果によれば、リュウグウの石は 100°C 以上、1 万気圧以上の温度、圧力には晒されていませんでした。この観察事実と計算結果から、リュウグウのもとになった岩体は本図の 100°C、1 万気圧の線より外側に位置していた可能性が高いことがわかりました。

### <注釈>

- 注1. 3点曲げ試験は図1に示しているように試料を2本の支持棒で支え、その中心を1本の押し棒で押す試験です。押し棒の変位と荷重の関係を調べます。押し棒の変位が大きくなると試料がたわみ、曲げ応力が発生します。試料が破断したときの応力がその試料の強度です。試料を長方形に加工しさえすれば、強度を計測できる堅実な手法であるため今回は3点曲げ試験法を採用しました。
- 注2. 密度、音速、比熱、熱膨張率のデータを使用しました。
- 注3. 状態方程式は物質内に発生する圧力を密度と温度の関数として表す式です。熱力学から視た物質の個性を表現する方程式といえます。質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則からなる流体方程式と組み合わせることで、リュウグウの母天体が破壊された際の高速度衝突で何が起こるかを計算機で調べました。

### <謝辞>

本研究は科学研究費補助金 JP18KK0092、JP19H00726、JP21K18660、JP21H01140 の援助を受けて実施されました。数値衝突計算は iSALE (impact-Simplified Arbitrary Lagrangian Eularian, <https://isale-code.github.io>) を用いて行われました。

### <掲載論文>

雑誌名: *Science*

論文タイトル: Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples

著者: T. Nakamura<sup>1</sup>, M. Matsumoto<sup>1</sup>, K. Amano<sup>1</sup>, Y. Enokido<sup>1</sup>, M. E. Zolensky<sup>2</sup>, T. Mikouchi<sup>3</sup>, H. Genda<sup>4</sup>, S. Tanaka<sup>5,6</sup>, M. Y. Zolotov<sup>7</sup>, **K. Kurosawa**<sup>8</sup>, S. Wakita<sup>9</sup>, R. Hyodo<sup>5</sup>, H. Nagano<sup>10</sup>, D. Nakashima<sup>1</sup>, Y. Takahashi<sup>11,12</sup>, Y. Fujioka<sup>1</sup>, M. Kikuchi<sup>1</sup>, E. Kagawa<sup>1</sup>, M. Matsuoka<sup>13,14</sup>, A. J. Brearley<sup>15</sup>, A. Tsuchiyama<sup>16,17,18</sup>, M. Uesugi<sup>19</sup>, J. Matsuno<sup>16</sup>, Y. Kimura<sup>20</sup>, M. Sato<sup>11</sup>, R. E. Milliken<sup>21</sup>, E. Tatsumi<sup>22,11</sup>, **S. Sugita**<sup>11,8</sup>, T. Hiroi<sup>21</sup>, K. Kitazato<sup>23</sup>, D. Brownlee<sup>24</sup>, D. J. Joswiak<sup>24</sup>, M. Takahashi<sup>1</sup>, K. Ninomiya<sup>25</sup>, T. Takahashi<sup>26,27</sup>, T. Osawa<sup>28</sup>, K. Terada<sup>29</sup>, F. E. Brenker<sup>30</sup>, B. J. Tkalcec<sup>30</sup>, L. Vincze<sup>31</sup>, R. Brunetto<sup>32</sup>, A. Aléon-Toppani<sup>32</sup>, Q. H. S. Chan<sup>33</sup>, M. Roskosz<sup>34</sup>, J.-C. Viennet<sup>34</sup>, P. Beck<sup>35</sup>, E. E. Alp<sup>36</sup>, T. Michikami<sup>37</sup>, Y. Nagaashi<sup>38,1</sup>, T. Tsuji<sup>39,40</sup>, Y. Ino<sup>41,5</sup>, J. Martinez<sup>2</sup>, J. Han<sup>42</sup>, A. Dolocan<sup>43</sup>, R. J. Bodnar<sup>44</sup>, M. Tanaka<sup>45</sup>, H. Yoshida<sup>11</sup>, K. Sugiyama<sup>46</sup>, A. J. King<sup>47</sup>, K. Fukushi<sup>48</sup>, H. Suga<sup>49</sup>, S. Yamashita<sup>50,51</sup>, T. Kawai<sup>11</sup>, K. Inoue<sup>48</sup>, A. Nakato<sup>5</sup>, T. Noguchi<sup>52,53</sup>, F. Vilas<sup>54</sup>, A. R. Hendrix<sup>54</sup>, C. Jaramillo-Correa<sup>55</sup>, D. L. Domingue<sup>54</sup>, G. Dominguez<sup>56</sup>, Z. Gainsforth<sup>57</sup>, C. Engrand<sup>58</sup>, J. Duprat<sup>34</sup>, S. S. Russell<sup>47</sup>, E. Bonato<sup>59</sup>, C. Ma<sup>60</sup>, T. Kawamoto<sup>61</sup>, T. Wada<sup>1</sup>, S. Watanabe<sup>5,26</sup>, R. Endo<sup>62</sup>, S. Enju<sup>63</sup>, L. Riu<sup>64</sup>, S. Rubino<sup>32</sup>, P. Tack<sup>31</sup>, S. Takeshita<sup>65</sup>, Y. Takeichi<sup>50,51,66</sup>, A. Takeuchi<sup>19</sup>, A. Takigawa<sup>11</sup>, D. Takir<sup>2</sup>, T. Tanigaki<sup>67</sup>, A. Taniguchi<sup>68</sup>, K. Tsukamoto<sup>1</sup>, T. Yagi<sup>69</sup>, S. Yamada<sup>70</sup>, K. Yamamoto<sup>71</sup>, Y. Yamashita<sup>69</sup>, M. Yasutake<sup>19</sup>, K. Uesugi<sup>19</sup>, I. Umegaki<sup>72,65</sup>, I. Chiu<sup>25</sup>, T. Ishizaki<sup>5</sup>, S. Okumura<sup>52</sup>, E. Palomba<sup>73</sup>, C. Pilorget<sup>32,74</sup>, S. M. Potin<sup>13,75</sup>, A. Alasli<sup>10</sup>, S. Anada<sup>71</sup>, Y. Araki<sup>76</sup>, N. Sakatani<sup>70,5</sup>, C. Schultz<sup>21</sup>, O. Sekizawa<sup>49</sup>, S. D. Sitzman<sup>77</sup>, K. Sugiura<sup>4</sup>, M. Sun<sup>17,18,78</sup>, E. Dartois<sup>79</sup>, E. De Pauw<sup>31</sup>, Z. Dionnet<sup>32</sup>, Z. Djouadi<sup>32</sup>, G. Falkenberg<sup>80</sup>, R. Fujita<sup>10</sup>, T. Fukuma<sup>81</sup>, I. R. Gearba<sup>43</sup>, K. Hagiya<sup>82</sup>, M. Y. Hu<sup>36</sup>, T. Kato<sup>71</sup>, T. Kawamura<sup>83</sup>, M. Kimura<sup>50,51</sup>, M. K. Kubo<sup>84</sup>, F. Langenhorst<sup>85</sup>, C. Lantz<sup>32</sup>, B. Lavina<sup>86</sup>, M. Lindner<sup>30</sup>, J. Zhao<sup>36</sup>, B. Vekemans<sup>31</sup>, D. Baklouti<sup>32</sup>, B. Bazi<sup>31</sup>, F. Borondics<sup>87</sup>, S. Nagasawa<sup>26,27</sup>, G. Nishiyama<sup>11</sup>, K. Nitta<sup>49</sup>, J. Mathurin<sup>88</sup>, T. Matsumoto<sup>52</sup>, I. Mitsukawa<sup>52</sup>, H. Miura<sup>89</sup>, A. Miyake<sup>52</sup>, Y. Miyake<sup>65</sup>, H. Yurimoto<sup>90</sup>, R. Okazaki<sup>91</sup>, H. Yabuta<sup>92</sup>, H. Naraoka<sup>91</sup>, K. Sakamoto<sup>5</sup>, S. Tachibana<sup>11,5</sup>, H. C. Connolly Jr.<sup>93</sup>, D. S. Laretta<sup>94</sup>, M. Yoshitake<sup>5</sup>, M. Yoshikawa<sup>5,6</sup>, K. Yoshikawa<sup>95</sup>, K. Yoshihara<sup>5</sup>, Y. Yokota<sup>5</sup>, K. Yogata<sup>5</sup>, H. Yano<sup>5,6</sup>, Y. Yamamoto<sup>5,6</sup>, D. Yamamoto<sup>5</sup>, **M. Yamada**<sup>8</sup>, T. Yamada<sup>5</sup>, T. Yada<sup>5</sup>, **K. Wada**<sup>8</sup>, T. Usui<sup>5,11</sup>, R. Tsukizaki<sup>5</sup>, F. Terui<sup>96</sup>, H. Takeuchi<sup>5,6</sup>, Y. Takei<sup>5</sup>, A. Iwamae<sup>97</sup>, H. Soejima<sup>5,97</sup>, K. Shirai<sup>5</sup>, Y. Shimaki<sup>5</sup>, **H. Senshu**<sup>8</sup>, H. Sawada<sup>5</sup>, T. Saiki<sup>5</sup>, M. Ozaki<sup>5,6</sup>, G. Ono<sup>95</sup>, T. Okada<sup>5,98</sup>, N. Ogawa<sup>5</sup>, K. Ogawa<sup>5</sup>, R. Noguchi<sup>99</sup>, H. Noda<sup>100</sup>, M. Nishimura<sup>5</sup>, N. Namiki<sup>100,6</sup>, S. Nakazawa<sup>5</sup>, T. Morota<sup>11</sup>, A. Miyazaki<sup>5</sup>, A. Miura<sup>5</sup>, Y. Mimasu<sup>5</sup>, K. Matsumoto<sup>100,6</sup>, K. Kumagai<sup>5,97</sup>, T. Kouyama<sup>101</sup>, **S. Kikuchi**<sup>8,100</sup>, K. Kawahara<sup>5</sup>, S. Kameda<sup>70,5</sup>, T. Iwata<sup>5,6</sup>, Y. Ishihara<sup>102</sup>, M. Ishiguro<sup>103</sup>, H. Ikeda<sup>95</sup>, S. Hosoda<sup>5</sup>, R.

Honda<sup>104,105</sup>, C. Honda<sup>23</sup>, Y. Hitomi<sup>5,97</sup>, N. Hirata<sup>38</sup>, N. Hirata<sup>23</sup>, T. Hayashi<sup>5</sup>, M. Hayakawa<sup>5</sup>, K. Hatakeda<sup>5,97</sup>, S. Furuya<sup>11</sup>, R. Fukai<sup>5</sup>, A. Fujii<sup>5</sup>, Y. Cho<sup>11</sup>, M. Arakawa<sup>38</sup>, M. Abe<sup>5,6</sup>, S. Watanabe<sup>106</sup>, Y. Tsuda<sup>5</sup>.

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan.

<sup>2</sup>NASA Johnson Space Center; Houston TX 77058, USA.

<sup>3</sup>The University Museum, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.

<sup>4</sup>Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8550, Japan.

<sup>5</sup>Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagami-hara 252-5210, Japan.

<sup>6</sup>Department of Space and Astronautical Science, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Hayama 240-0193, Japan.

<sup>7</sup>School of Earth and Space Exploration, Arizona State University, Tempe AZ 85287, USA.

**<sup>8</sup>Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, Narashino 275-0016, Japan.**

<sup>9</sup>Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02139, USA.

<sup>10</sup>Department of Mechanical Systems Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan.

<sup>11</sup>Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.

<sup>12</sup>Isotope Science Center, The University of Tokyo, Tokyo 113-0032, Japan

<sup>13</sup>Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (LESIA), Observatoire de Paris, Meudon 92195 France

<sup>14</sup>Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, 305-8567, Japan.

<sup>15</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, University of New Mexico, Albuquerque NM 87131, USA.

<sup>16</sup>Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, Kusatsu 525-8577, Japan.

<sup>17</sup>Chinese Academy of Sciences (CAS) Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Physics and Materials, Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China.

<sup>18</sup>CAS Center for Excellence in Deep Earth Science, Guangzhou 510640, China.

<sup>19</sup>Scattering and Imaging Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo 679-5198, Japan.

<sup>20</sup>Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo 060-0819, Japan.

<sup>21</sup>Department of Earth, Environmental, and Planetary Sciences, Brown University, Providence, RI 02912, USA.

<sup>22</sup>Instituto de Astrofísica de Canarias, University of La Laguna, Tenerife 38205, Spain.

<sup>23</sup>Aizu Research Center for Space Informatics, The University of Aizu, Aizu-Wakamatsu 965-8580, Japan.

<sup>24</sup>Department of Astronomy, University of Washington, Seattle WA 98195 USA.

<sup>25</sup>Institute for Radiation Sciences, Osaka University, Toyonaka 560-0043, Japan.

<sup>26</sup>Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (The World Premier International Research Center Initiative), The University of Tokyo, Kashiwa 277-8583, Japan.

<sup>27</sup>Department of Physics, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.

<sup>28</sup>Materials Sciences Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Tokai 319-1195, Japan.

<sup>29</sup>Department of Earth and Space Science, Osaka University; Toyonaka 560-0043, Japan.

<sup>30</sup>Institute of Geoscience, Goethe University, Frankfurt, 60438 Frankfurt am Main, Germany.

<sup>31</sup>Department of Chemistry, Ghent University, Krijgslaan 281 S12, Ghent, Belgium.

<sup>32</sup>Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, Orsay 91405, France.

<sup>33</sup>Department of Earth Sciences, Royal Holloway University of London, Egham TW20 0EX, UK.

<sup>34</sup>Institut de Minéralogie, Physique des Matériaux et Cosmochimie, Muséum National d'Histoire Naturelle, Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Sorbonne Université, Paris, France.

<sup>35</sup>Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble, CNRS, Université Grenoble Alpes, 38000 Grenoble, France.

<sup>36</sup>Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory, Argonne, IL 60439, USA.

<sup>37</sup>Faculty of Engineering, Kindai University, Higashi-Hiroshima 739-2116, Japan.

<sup>38</sup>Department of Planetology, Kobe University, Kobe 657-8501, Japan.

- <sup>39</sup>Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan.
- <sup>40</sup>School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
- <sup>41</sup>Department of Physics, Kwansai Gakuin University, Sanda 669-1330, Japan.
- <sup>42</sup>Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Houston, Houston TX 77204, USA.
- <sup>43</sup>Texas Materials Institute, The University of Texas at Austin, Austin TX 78712, USA.
- <sup>44</sup>Department of Geoscience, Virginia Tech., Blacksburg VA 24061, USA.
- <sup>45</sup>Materials Analysis Station, National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Japan.
- <sup>46</sup>Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan.
- <sup>47</sup>Department of Earth Science, Natural History Museum, London SW7 5BD, UK.
- <sup>48</sup>Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, Kanazawa 920-1192, Japan.
- <sup>49</sup>Spectroscopy Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo 679-5198, Japan.
- <sup>50</sup>Department of Materials Structure Science, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan.
- <sup>51</sup>Institute of Materials Structure Science, High-Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba 305-0801, Japan.
- <sup>52</sup>Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University; Kyoto 606-8502, Japan
- <sup>53</sup>Faculty of Arts and Science, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan.
- <sup>54</sup>Planetary Science Institute, Tucson AZ 85719, USA.
- <sup>55</sup>The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA.
- <sup>56</sup>Department of Physics, California State University, San Marcos, CA 92096, USA.
- <sup>57</sup>Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, California 94720, USA.
- <sup>58</sup>Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie, Université Paris-Saclay, CNRS, 91405 Orsay, France.
- <sup>59</sup>Institute for Planetary Research, Deutsches Zentrum für Luftund Raumfahrt, Rutherfordstraße 2 12489 Berlin, Germany.
- <sup>60</sup>Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena CA 91125, USA.
- <sup>61</sup> Department of Geosciences, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan.
- <sup>62</sup>Department of Materials Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8550, Japan.
- <sup>63</sup>Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, Matsuyama 790-8577, Japan.
- <sup>64</sup>European Space Astronomy Centre, 28692 Villanueva de la Cañada, Spain.
- <sup>65</sup>High Energy Accelerator Research Organization, Tokai 319-1106, Japan.
- <sup>66</sup>Department of Applied Physics, Osaka University, Suita, 565-0871, Japan
- <sup>67</sup>Hitachi, Ltd., Hatoyama 350-0395, Japan.
- <sup>68</sup>Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University, Kumatori 590-0494, Japan.
- <sup>69</sup>National Metrology Institute of Japan, AIST, Tsukuba 305-8565, Japan.
- <sup>70</sup>Department of Physics, Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan.
- <sup>71</sup>Japan Fine Ceramics Center, Nagoya 456-8587, Japan.
- <sup>72</sup>Toyota Central Research and Development Laboratories, Inc., Nagakute 480-1192, Japan.
- <sup>73</sup>Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali, Istituto Nazionale di Astrofisica, Rome 00133, Italy.
- <sup>74</sup>Institut Universitaire de France, Paris, France.
- <sup>75</sup>Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands
- <sup>76</sup>Department of Physical Sciences, Ritsumeikan University, Shiga 525-0058, Japan.
- <sup>77</sup>Physical Sciences Laboratory, The Aerospace Corporation, California 90245, USA.
- <sup>78</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.
- <sup>79</sup>Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay, Université Paris-Saclay, CNRS, 91405 Orsay, France.
- <sup>80</sup>Deutsches Elektronen-Synchrotron Photon Science, 22603 Hamburg, Germany.
- <sup>81</sup>Nano Life Science Institute (The World Premier International Research Center Initiative), Kanazawa University, 920-1192, Japan.
- <sup>82</sup>Graduate School of Life Science, University of Hyogo, Hyogo 678-1297, Japan.
- <sup>83</sup>Institut de Physique du Globe de Paris, Université de Paris, Paris 75205, France.

- <sup>84</sup>Division of Natural Sciences, International Christian University, Mitaka 181-8585, Japan.
- <sup>85</sup>Institute of Geosciences, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07745 Jena, Germany.
- <sup>86</sup>Center for Advanced Radiation Sources, The University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA.
- <sup>87</sup>Optimized Light Source of Intermediate Energy to LURE (SOLEIL) Synchrotron, L'Orme des Merisiers, Gif sur Yvette Cedex, F-91192, France.
- <sup>88</sup>Institut Chimie Physique, Université Paris-Saclay, CNRS, 91405 Orsay, France.
- <sup>89</sup>Graduate School of Science, Nagoya City University, Nagoya 467-8501, Japan.
- <sup>90</sup>Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, Sapporo 060-0810, Japan.
- <sup>91</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan.
- <sup>92</sup>Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan.
- <sup>93</sup>Department of Geology, Rowan University, Glassboro NJ 08028, USA.
- <sup>94</sup>Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona; Tucson AZ 85721, USA.
- <sup>95</sup>Research and Development Directorate, JAXA, Sagamihara 252-5210, Japan.
- <sup>96</sup>Department of Mechanical Engineering, Kanagawa Institute of Technology, Atsugi 243-0292, Japan.
- <sup>97</sup>Marine Works Japan Ltd., Yokosuka 237-0063 Japan.
- <sup>98</sup>Department of Chemistry, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
- <sup>99</sup>Faculty of Science, Niigata University, Niigata 950-2181, Japan.
- <sup>100</sup>National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka 181-8588, Japan.
- <sup>101</sup>Digital Architecture Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tokyo 135-0064, Japan.
- <sup>102</sup>JAXA Space Exploration Center, JAXA, Sagamihara 252-5210, Japan.
- <sup>103</sup>Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 08826, Korea.
- <sup>104</sup>Department of Information Science, Kochi University, Kochi 780-8520, Japan
- <sup>105</sup>Center for Data Science, Ehime University, Matsuyama 790-8577, Japan.
- <sup>106</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan.
- DOI 番号:10.1126/science.abn8671
- URL:<https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn8671>

<お問い合わせ先>

黒澤 耕介 (くろさわ こうすけ)

千葉工業大学 惑星探査研究センター 上席研究員

〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

TEL: 047-478-4386 もしくは 047-478-0320

FAX:047-478-0372

E-Mail: [kosuke.kurosawa@perc.it-chiba.ac.jp](mailto:kosuke.kurosawa@perc.it-chiba.ac.jp)