

報道関係各位

2023年7月10日

茨城大学
北海道大学
東京工業大学
東京大学大学院理学系研究科

【プレスリリース】

リュウグウの炭酸塩から酸素濃度・ガス分子種の変遷を解読

炭素・酸素同位体比に基づく天体進化モデルを構築 形成・変質過程の手がかりに

〈ポイント〉

- 小惑星リュウグウの試料の炭酸塩粒子に対して、酸素・炭素の両方の分析を初めて網羅的に行った。
- リュウグウに含まれる方解石と苦灰石の同位体比変動の違いがわかった。
- 炭酸塩粒子から、リュウグウにおける酸素濃度・存在するガス分子種の変遷を解読することに成功した。
- 今回の結果は、リュウグウの母天体の形成時、揮発性の高い成分が固体（氷）として取り込まれたことを示唆する。
- 小惑星採取のサンプルや隕石の酸素・炭素の両方の分析は、小惑星や母天体の変質過程の解明にきわめて有効であり、今回の研究でそのモデルを示した。

茨城大学大学院理工学研究科（理学野）の藤谷渉准教授、北海道大学大学院理学研究院の川崎教准教授および坂本尚義教授、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橋省吾教授らの研究チームは、探査機はやぶさ2が回収した小惑星リュウグウの試料を分析し、リュウグウにおける酸素濃度や存在するガス分子種の変遷を明らかにしました。

本研究では、リュウグウの試料における炭酸塩鉱物（方解石および苦灰石）に含まれる炭素と酸素の同位体の存在量比を調べました。すると、方解石では炭素・酸素どちらの同位体比も異なる粒子の間で大きな変動がある一方、苦灰石ではほとんど変動は見られませんでした。この分析結果は、方解石はリュウグウにおける変質作用の初期、温度や酸素濃度が上昇中、ガス分子種の割合が変化しているときに形成され、一方、苦灰石は系が平衡状態にあり、より高温で、ガスの中で二酸化炭素の割合が相対的に高い状態で形成されたことを示唆します。

こうした炭酸塩鉱物の同位体組成は、これまでの隕石研究では報告されていませんでした。このことから、リュウグウや隕石の母天体はそれぞれ異なる物質から構成され、独特の環境で進化したと言えます。

この成果は、2023年7月10日、Nature Geoscience誌に掲載されます。

■背景

宇宙航空研究開発機構（JAXA）の小惑星探査機はやぶさ2は小惑星リュウグウから表層の物質を回収し、2020年12月に地球に試料を届けました。2021年の6月から初期分析が行われ、北海道大学の坂本尚義教授がリードする「化学チーム」は、リュウグウ試料の化学組成・同位体比^(注1)から、リュウグウ試料はイヴナ型炭素質コンドライト^(注2)と類似しており、水を多量に含み、母天体^(注3)上で水による岩石・有機物の変質作用が顕著に起こっていることを明らかにしました。リュウグウ試料から、惑星の前駆体である小天体上での変質作用に伴う物質の進化が明らかになることが期待されています。

一方で、リュウグウにおける変質作用の環境、例えば、温度・水溶液の組成・酸素 fugacity^(注4)・共存するガス分子の種類などは、元の物質が変質作用を経て現在のリュウグウの姿になるまでの過程を決定づける重要な要素ですが、これまでその変遷は明らかになっていませんでした。

■研究手法・成果

初期分析の一環として、本研究チームでは、リュウグウ試料およびイヴナ隕石に含まれる炭酸塩鉱物（方解石： CaCO_3 および苦灰石： $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ）の炭素・酸素同位体比を測定しました。炭酸塩鉱物は、リュウグウやイヴナ隕石の母天体において、水溶液から沈殿したと考えられる物質で、変質作用の環境に関する情報を保持しています。

同位体比測定は北海道大学の二次イオン質量分析計^(注5)を用いて行われました。特に方解石は粒子が10 μm 以下と小さいため（**図1**）、一つの粒子に対して炭素と酸素の両方の分析を行うためには極微小領域の分析技術が必要でした。本研究チームでは、1 μm まで小さく絞ったビームを照射して分析する技術を独自に開発し、方解石・苦灰石の分析を網羅的に行うことに初めて成功しました。

分析の結果、方解石では炭素・酸素どちらの同位体比も異なる粒子の間で大きな変動がある一方、苦灰石ではほとんど変動は見られませんでした（**図2**）。同位体比は、粒子が形成した温度および共存する水溶液やガスの同位体比を反映します。酸素同位体比の変動は、粒子が形成した温度の変化と、岩石との反応による水の酸素同位体比の変化で説明できますが、炭素同位体比の変動はそれだけでは説明できません。本研究チームでは、炭酸塩鉱物と共存する二酸化炭素・一酸化炭素・メタンなど炭素を含むガス分子種の割合が変化すれば、炭素同位体比の変動を最も合理的に説明できると考えました。それらのガスおよび炭酸塩鉱物との間には、同位体分別^(注6)と呼ばれる現象による同位体比の差異が生じるためです。それらのガスの割合は酸素フガシティに依存し、より高い酸素フガシティにおいては二酸化炭素の割合が高くなります。したがって、方解石はリュウグウにおける変質作用の初期、温度と酸素フガシティが上昇中、二酸化炭素・一酸化炭素・メタンの存在量に変化しているときに形成されたと結論しました。一方、苦灰石は系が平衡状態にあり、温度と酸素フガシティがより高く、ガスの中で二酸化炭素の割合が相対的に高い状態で形成されたと考えられます。以上の考察は、リュウグウやイヴナ隕石の母天体が形成したときに、二酸化炭素・一酸化炭素・メタンなど揮発性の高い成分が固体（氷）として取り込まれていたことを示唆しています。

■今後の展望

本研究で得られたような炭酸塩鉱物の同位体組成は、これまでの隕石研究では報告されていませんでした。このことから、リュウグウや隕石の母天体はそれぞれ異なる物質から構成され、独特の環境で進化したと言えます。今後の研究で、リュウグウや隕石の構成物質、特に揮発性成分（水や二酸化炭素、有機物など）の量や種類が後の進化に与える影響について明らかになっていくと考えられます。ところで、これまでの研究から、リュウグウの母天体は太陽から遠く離れた領域で形成したことが示唆されています。そのような極低温の領域で、どのような揮発性成分がどの程度の量で母天体に含まれるかという点も、今後の興味深い研究対象です。

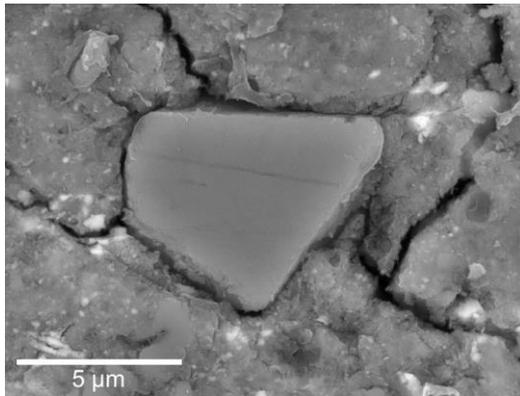


図1：リュウグウ試料中の方解石の電子顕微鏡像（反射電子）

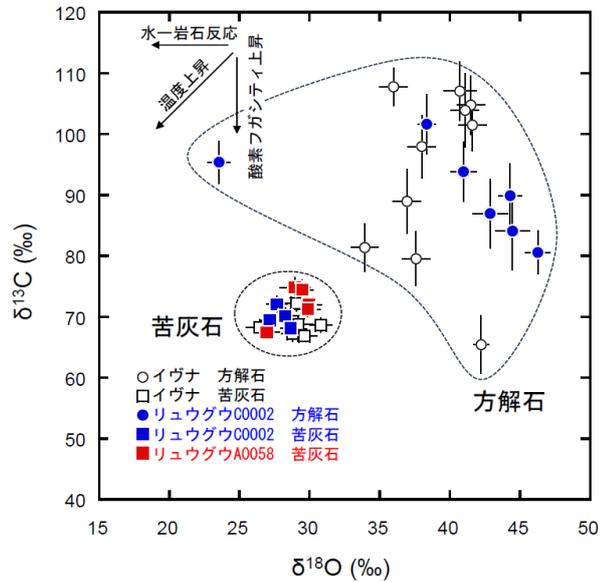


図2：リュウグウ試料およびイヴナ隕石中の方解石、苦灰石の炭素・酸素同位体比。方解石は苦灰石に比べて大きな変動を示す。水-岩石反応、温度上昇、酸素フガシィ上昇に伴う同位体比の変化は矢印で模式的に示す。

■用語説明（必要に応じて）

(注1) 同位体：原子番号（＝陽子数）が等しい同じ元素において、質量数が異なる（つまり、中性子数が異なる）もの。同位体の存在量比を同位体比といい、炭素・酸素の場合は $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比および $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比・ $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比である。

(注2) イヴナ型炭素質コンドライト：イヴナ隕石に代表される希少な隕石グループ。水や有機物などを豊富に含む。その元素存在量は太陽系全体の平均組成に近い。

(注3) 母天体：隕石などの起源天体（多くは小惑星）のことを母天体と呼ぶ。リュウグウは小惑星であるが、その密度や空隙率から、より大きな天体が破碎した岩片が再集積して形成したと考えられており、ここではその元の天体のことを母天体と呼んでいる。

(注4) フガシィ：理想気体の圧力に相当し、実在気体においても化学平衡を扱うことができるように導入される熱力学の概念。

(注5) 二次イオン質量分析計：固体試料の表面にイオンビーム（一次イオン）を照射し、発生するイオン（二次イオン）を質量で分離して検出することで、試料の化学組成・同位体比を定量する手法。

(注6) 同位体分別：同位体の質量の違いによって原子・分子の性質の違いが生じ、同位体の相対的な存在量を変えるような過程。ここでは、二つの共存する物質の間で同位体比の差異が生じることを指す。

■論文情報

タイトル : Carbonate record of temporal change in oxygen fugacity and gaseous species in asteroid Ryugu (炭酸塩鉱物が記録する小惑星リュウグウでの酸素フガシティおよびガス種の時間的変遷)

著者 : Wataru Fujiya^{1*}, Noriyuki Kawasaki², Kazuhide Nagashima³, Naoya Sakamoto⁴, Conel M. O'D. Alexander⁵, Noriko T. Kita⁶, Kouki Kitajima⁶, Yoshinari Abe⁷, Jérôme Aléon⁸, Sachiko Amari^{9,10}, Yuri Amelin¹¹, Ken-ichi Bajor², Martin Bizzarro¹², Audrey Bouvier¹³, Richard W. Carlson⁵, Marc Chaussidon¹⁴, Byeon-Gak Choi¹⁵, Nicolas Dauphas¹⁶, Andrew M. Davis¹⁶, Tommaso Di Rocco¹⁷, Ryota Fukai¹⁸, Ikshu Gautam¹⁹, Makiko K. Haba¹⁹, Yuki Hibiya²⁰, Hiroshi Hidaka²¹, Hisashi Homma²², Peter Hoppe²³, Gary R. Huss³, Kiyohiro Ichida²⁴, Tsuyoshi Iizuka²⁵, Trevor R. Ireland²⁶, Akira Ishikawa¹⁹, Shoichi Itoh²⁷, Thorsten Kleine²⁸, Shintaro Komatani²⁴, Alexander N. Krot³, Ming-Chang Liu^{29,30}, Yuki Masuda¹⁹, Kevin D. McKeegan²⁹, Mayu Morita²⁴, Kazuko Motomura³¹, Frédéric Moynier¹⁴, Izumi Nakai³², Ann Nguyen³³, Larry Nittler⁵, Morihiko Onose²⁴, Andreas Pack¹⁷, Changkun Park³⁴, Laurette Piani³⁵, Liping Qin³⁶, Sara S. Russell³⁷, Maria Schönbächler³⁸, Lauren Tafla²⁹, Haolan Tang²⁹, Kentaro Terada³⁹, Yasuko Terada⁴⁰, Tomohiro Usui¹⁸, Sohei Wada², Meenakshi Wadhwa⁴¹, Richard J. Walker⁴², Katsuyuki Yamashita⁴³, Qing-Zhu Yin⁴⁴, Tetsuya Yokoyama¹⁹, Shigekazu Yoneda⁴⁵, Edward D. Young²⁹, Hiroharu Yui⁴⁶, Ai-Cheng Zhang⁴⁷, Tomoki Nakamura⁴⁸, Hiroshi Naraoka⁴⁹, Takaaki Noguchi²⁷, Ryuji Okazaki⁴⁹, Kanako Sakamoto¹⁸, Hikaru Yabuta⁵⁰, Masanao Abe¹⁸, Akiko Miyazaki¹⁸, Aiko Nakato¹⁸, Masahiro Nishimura¹⁸, Tatsuaki Okada¹⁸, Toru Yada¹⁸, Kasumi Yogata¹⁸, Satoru Nakazawa¹⁸, Takanao Saiki¹⁸, Satoshi Tanaka¹⁸, Fuyuto Terui⁵¹, Yuichi Tsuda¹⁸, Sei-ichiro Watanabe²¹, Makoto Yoshikawa¹⁸, Shogo Tachibana⁵², and Hisayoshi Yurimoto²

¹Faculty of Science, Ibaraki University; Mito 310-8512, Japan. ²Department of Natural History Sciences, Hokkaido University; Sapporo 060-0810, Japan. ³Hawai'i Institute of Geophysics and Planetology, University of Hawai'i at Mānoa; Honolulu, HI 96822, USA. ⁴Isotope Imaging Laboratory, Creative Research Institution, Hokkaido University; Sapporo 001-0021, Japan. ⁵Earth and Planets Laboratory, Carnegie Institution for Science; Washington, DC, 20015, USA. ⁶Geoscience, University of Wisconsin- Madison; Madison, WI 53706, USA. ⁷Graduate School of Engineering Materials Science and Engineering, Tokyo Denki University; Tokyo 120-8551, Japan. ⁸Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie, Sorbonne Université, Museum National d'Histoire Naturelle, CNRS UMR 7590, IRD; 75005 Paris, France. ⁹McDonnell Center for the Space Sciences and Physics Department, Washington University; St. Louis, MO 63130, USA. ¹⁰Geochemical Research Center, The University of Tokyo; Tokyo 113-0033, Japan. ¹¹Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences; Guangzhou, GD 510640, China. ¹²Centre for Star and Planet Formation, GLOBE Institute, University of Copenhagen; Copenhagen, K 1350, Denmark. ¹³Bayerisches Geoinstitut, Universität Bayreuth; Bayreuth 95447, Germany. ¹⁴Université Paris Cité, Institut de physique du globe de Paris, CNRS; 75005 Paris, France. ¹⁵Department of Earth Science Education, Seoul National University; Seoul 08826, Republic of Korea. ¹⁶Department of the Geophysical Sciences and Enrico Fermi Institute, The University of Chicago, 5734 South Ellis Avenue, Chicago 60637, USA. ¹⁷Faculty of Geosciences and Geography, University of Göttingen; Göttingen, D-37077, Germany. ¹⁸ISAS/JSEC, JAXA; Sagami-hara 252-5210, Japan. ¹⁹Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology; Tokyo 152-8551, Japan. ²⁰Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo; Tokyo 153-8904, Japan. ²¹Earth and Planetary Sciences, Nagoya University; Nagoya 464-8601, Japan.



茨城大学
Ibaraki University



北海道大学
HOKKAIDO UNIVERSITY



東京工業大学
Tokyo Institute of Technology



東京大学 大学院
理学系研究科・理学部
SCHOOL OF SCIENCE, THE UNIVERSITY OF TOKYO

²²Osaka Application Laboratory, SBUWDX, Rigaku Corporation; Osaka 569-1146, Japan. ²³Max Planck Institute for Chemistry; Mainz 55128, Germany. ²⁴Analytical Technology, Horiba Techno Service Co., Ltd.; Kyoto 601-8125, Japan. ²⁵Earth and Planetary Science, The University of Tokyo; Tokyo 113-0033, Japan. ²⁶School of Earth and Environmental Sciences, The University of Queensland; St Lucia QLD 4072, Australia. ²⁷Earth and Planetary Sciences, Kyoto University; Kyoto 606-8502, Japan. ²⁸Max Planck Institute for Solar System Research; 37077 Göttingen, Germany. ²⁹Earth, Planetary, and Space Sciences, UCLA; Los Angeles, CA 90095, USA. ³⁰Lawrence Livermore National Laboratory; Livermore, CA 94550, USA. ³¹Thermal Analysis, Rigaku Corporation; Tokyo 196-8666, Japan. ³²Applied Chemistry, Tokyo University of Science; Tokyo 162-8601, Japan. ³³Astromaterials Research and Exploration Science, NASA Johnson Space Center; Houston, TX 77058, USA. ³⁴Earth-System Sciences, Korea Polar Research Institute; Incheon 21990, Korea. ³⁵Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, CNRS - Université de Lorraine; 54500 Nancy, France. ³⁶University of Science and Technology of China, School of Earth and Space Sciences; Anhui 230026, China. ³⁷Department of Earth Sciences, Natural History Museum; London, SW7 5BD, UK. ³⁸Institute for Geochemistry and Petrology, Department of Earth Sciences, ETH Zurich; Zurich, Switzerland. ³⁹Earth and Space Science, Osaka University; Osaka 560-0043, Japan. ⁴⁰Spectroscopy and Imaging, Japan Synchrotron Radiation Research Institute; Hyogo 679-5198 Japan. ⁴¹School of Earth and Space Exploration, Arizona State University; Tempe, AZ 85281, USA. ⁴²Geology, University of Maryland; College Park, MD 20742, USA. ⁴³Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University; Okayama 700-8530, Japan. ⁴⁴Earth and Planetary Sciences, University of California; Davis, CA 95616, USA. ⁴⁵Science and Engineering, National Museum of Nature and Science; Tsukuba 305-0005, Japan. ⁴⁶Chemistry, Tokyo University of Science; Tokyo 162-8601, Japan. ⁴⁷School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University; Nanjing 210023, China. ⁴⁸Department of Earth Science, Tohoku University; Sendai, 980-8578, Japan. ⁴⁹Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University; Fukuoka 819-0395, Japan. ⁵⁰Earth and Planetary Systems Science Program, Hiroshima University; Higashi-Hiroshima, 739-8526, Japan. ⁵¹Kanagawa Institute of Technology; Atsugi 243-0292, Japan. ⁵²UTokyo Organization for Planetary and Space Science, University of Tokyo; Tokyo 113-0033, Japan. *Corresponding author.

雑誌 : Nature Geoscience

公開日 : 2023/07/10

DOI : 10.1038/s41561-023-01226-y