



## 小惑星ベヌーにアミノ酸など多くの生体関連分子が存在！

～DNA/RNA に必須の 5 種類の核酸塩基も全て検出～

### ポイント

- ・小惑星ベヌーから持ち帰られたサンプルからアミノ酸や核酸塩基など多種の生体関連分子を検出。
- ・多くの有機分子は低温環境における高濃度アンモニア溶液中での反応で生成した。
- ・地球外環境における化学進化及び小惑星の起源に関する理解が飛躍的に発展。

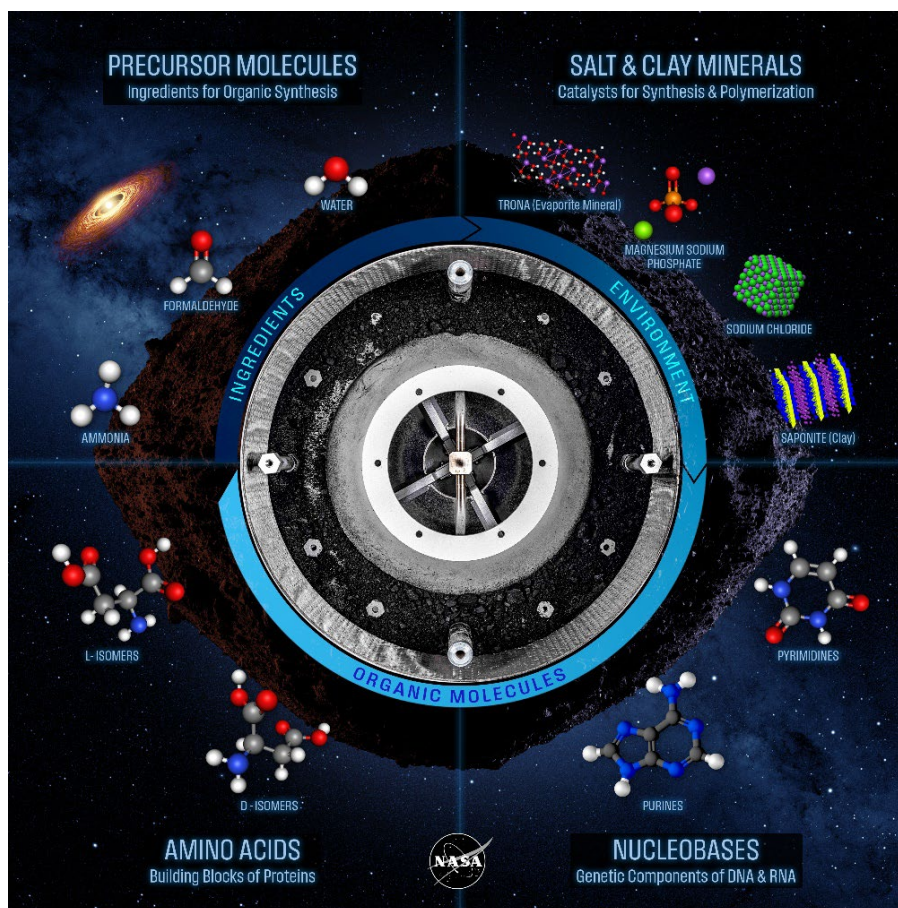
### 概要

北海道大学低温科学研究所の大場康弘准教授、海洋研究開発機構の高野淑識上席研究員（慶應義塾大学先端生命科学研究所特任准教授/同大学院政策・メディア研究科特任准教授）及び古賀俊貴ポスドクトラル研究員、東北大学大学院理学研究科の古川善博准教授、九州大学大学院理学研究院の奈良岡浩教授らが所属する国際研究グループ（OSIRIS-REx sample analysis team）は、アメリカ NASA 主導の小惑星探査計画「OSIRIS-REx」で炭素質 B 型小惑星（101955）ベヌー（Bennu）から持ち帰られた粒子から、アミノ酸や核酸塩基、カルボン酸、アミンなど、様々な有機化合物の検出に成功しました。

2023 年 9 月 24 日、「OSIRIS-REx」探査機によって炭素質小惑星ベヌー試料 121.6 グラムが地球に届けられ、「はやぶさ」探査機による S 型小惑星イトカワ試料、「はやぶさ 2」探査機による炭素質 C 型小惑星リュウグウ試料に続いて、世界で 3 例目の小惑星リターンサンプルが実験室で分析可能になりました。NASA ゴダード宇宙飛行センターのダニエル・グレイビン博士をリーダーとする有機化合物分析チーム（SOAWG）では、持ち帰られた粒子に含まれる有機化合物を網羅的に分析しました。

分析チームがこれまでに培ってきた地球外試料分析技術を用いて、初期分析用に配分された約 300 ミリグラムの試料から、アミノ酸 33 種（うち、14 種のタンパク性アミノ酸）、地球生命の遺伝子に含まれる核酸塩基全 5 種を含む窒素複素環化合物\*123 種など、未同定なものを含めて 10,000 種にも及ぶ窒素を含む有機化合物を検出しました。検出されたアミノ酸は右手・左手構造がほぼ等量存在しました。これらの結果は、小惑星が地球に多様なアミノ酸を供給したことを示唆し、地球生命のアミノ酸のホモキラリティの起源の謎をさらに深めることになりました。また、アミノ酸や核酸塩基など生体関連分子合成の材料となるアンモニアの濃度が、これまでに分析された炭素質隕石や小惑星リュウグウと比べて特異的に高いことが分かりました。これは、検出された有機化合物は低温環境におけるアンモニア溶液中での反応で生成した、というこれまでにない地球外有機物合成に関する知見をもたらしました。

なお、本研究成果は、2025 年 1 月 30 日（木）公開の *Nature Astronomy* 誌に掲載されました。



ベヌー試料の写真と帰還試料から検出された有機成分の概念図 (© NASA)

## 【背景】

2023年9月、アメリカ航空宇宙局（NASA）が主導する小惑星サンプルリターン計画「OSIRIS-REx (Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security, Regolith Explorer)、主任研究者：ダンテ・ローレッタ教授（アリゾナ大学）」によって、炭素質小惑星ベヌー（Bennu）（図1）から121.6グラムの粒子を持ち帰ることに成功しました。日本からも複数の研究機関に所属する研究者が同計画に参画して、万全の態勢で試料分析の準備を進めてきました。本研究では、NASAのダニエル・グレイビン博士をリーダーとするSOAWG（Sample Organic Analysis Working Group：有機化合物分析チーム）が初期分析用に配分されたベヌー試料を分析し、同試料に含まれる有機化合物の網羅分析を行いました。今回、日本の研究者チームで担当した、地球生命の遺伝子に含まれる核酸塩基など窒素複素環化合物の分析の最初の成果について報告します。

## 【研究手法】

およそ100ミリグラムのベヌー試料を研究対象ごとに小分けし、アミノ酸やカルボン酸など、研究対象化合物ごとに構成された小分析チームに配分されました。OREX-803001-0サンプル（25.6ミリグラム）をガラスサンプル管内で水（1ミリリットル）とともに加熱して水溶性成分を抽出し、抽出液に含まれるアミノ酸などの溶存成分を液体クロマトグラフー超高分解能質量分析計で分析しました。また、核酸塩基は九州大学のクリーンルーム内にて、OREX-800044-101サンプル（17.75ミリグラム）をガラスサンプル管内で20%塩酸とともに加熱して抽出し、抽出液から無機塩を除去したのち、同様に分析しました（図2）。

## 【研究成果】

熱水抽出液から生命のタンパク質に用いられている 14 種を含む 33 種類のアミノ酸が検出されました。それらのアミノ酸のうち、鏡像異性体を持つ分子（いわゆる、右手・左手の関係。図 3）の多くは、右手・左手構造がほぼ等量存在（＝ラセミ体）することが分かりました。とくに、タンパク性アミノ酸であるアラニンやアスパラギン酸がラセミ体であることは、サンプルに地球上での生物由来の汚染が含まれていないことを示すだけでなく、地球上の生命に見られるアミノ酸の左手構造過剰とは一致しませんでした。これら分析結果は、小惑星が地球に多様なアミノ酸を供給したことを示唆し、地球外生命のホモキラリティの起源の謎をさらに深めることになりました。

また、塩酸抽出液からは生命の遺伝子 DNA（デオキシリボ核酸）、RNA（リボ核酸）に含まれる 5 種の核酸塩基全て（シトシン、ウラシル、チミン、アデニン、グアニン）を検出しました。これまでに炭素質隕石から検出された例はありましたが、ウラシルを除き、小惑星リターンサンプルからの検出は初めてです。また、アミノ酸など有機化合物合成時の窒素供給源として非常に重要なアンモニアは、これまでに分析された地球外物質と比べても極端に濃度が高いことが分かりました。こうした窒素が豊富なベヌー試料の組成は、硫黄が豊富なリュウグウ試料と対照的です。アンモニアは揮発性が高く、低温環境でなければ安定に存在できないため、高濃度のアンモニアの存在は、ベヌー母天体での有機化合物合成は低温でのアンモニア水中反応が支配的であったことを示します。

## 【今後への期待】

地球上での生命はいつどのように誕生したのか、いわゆる地球上での生命の起源は科学における最大の謎の一つです。その謎を解くためには、生命誕生前の地球上にどのような「生命の材料」がどれくらい存在していたのかを理解する必要があります。その理解には、重要な材料供給源の一つである、ベヌー試料のような地球外物質の分析が不可欠です。OSIRIS-REx 計画で持ち帰られた小惑星ベヌー試料は地球上での汚染が、これまでに分析された地球外物質の中でも最小限であるため、今後さらにベヌー試料に含まれる有機化合物が詳細に分析されることで、「生命材料の目録」がより明らかにされていくことが期待できます。また、小惑星リュウグウに含まれる有機分子群との詳細な比較検証や水質変成による水-鉱物-有機物の相互作用の歴史を含め、アミノ酸や核酸塩基以外の生命の材料候補の発見も強く期待されます。

現在、日本主導の火星衛星フォボスからのサンプルリターン計画「MMX（Martian Moons eXploration）」など、大規模な地球外サンプルリターン計画が進行しており、本研究で培った技術や知見が必ずそれらの成功に役立つと考えられます。

## 【謝辞】

本研究は、JSPS 科学研究費補助金（JP21H04501、JP23H03980、JP21KK0062）による研究助成、北海道大学低温科学研究所共同プロジェクト、ほか海外の機関からの研究助成を受けたものです。

## 論文情報

論文名 Abundant ammonia and nitrogen-rich soluble organic matter in samples from asteroid (101955) Bennu (小惑星ベヌーサンプルに含まれる多量のアンモニアと含窒素可溶性有機化合物)

著者名 Daniel P. Glavin<sup>1</sup>, Jason P. Dworkin<sup>1</sup>, Conel M. O'D. Alexander<sup>2</sup>, José C. Aponte<sup>1</sup>, Allison A. Baczynski<sup>3</sup>, Jessica J. Barnes<sup>4</sup>, Hans A. Bechtel<sup>5</sup>, Eve L. Berger<sup>6</sup>, Aaron S. Burton<sup>7</sup>, Paola Caselli<sup>8</sup>, Angela H. Chung<sup>1,9,10</sup>, Simon J. Clemett<sup>6,11</sup>, George D. Cody<sup>2</sup>, Gerardo Dominguez<sup>12</sup>, Jamie E. Elsila<sup>1</sup>, Kendra K. Farnsworth<sup>1,10,13</sup>, Dionysis I. Foustoukos<sup>2</sup>, Katherine H. Freeman<sup>3</sup>, 古川善博<sup>14</sup>, Zack Gainsforth<sup>15</sup>, Heather V. Graham<sup>1</sup>, Tommaso Grassi<sup>8</sup>, Barbara Michela Giuliano<sup>8</sup>, Victoria E. Hamilton<sup>16</sup>, Pierre Haenecour<sup>4</sup>, Philipp R. Heck<sup>17,18</sup>, Amy E. Hofmann<sup>19</sup>, Christopher H. House<sup>3</sup>, Yongsong Huang<sup>20</sup>, Hannah H. Kaplan<sup>1</sup>, Lindsay P. Keller<sup>6</sup>, Bumsoo Kim<sup>6,20,21</sup>, 古賀俊貴<sup>22</sup>, Michael Liss<sup>23,24</sup>, Hannah L. McLain<sup>1,9,10</sup>, Matthew A. Marcus<sup>5</sup>, Mila Matney<sup>3</sup>, Timothy J. McCoy<sup>25</sup>, Ophélie M. McIntosh<sup>3</sup>, Angel Mojarro<sup>1,26</sup>, 奈良岡浩<sup>27</sup>, Ann N. Nguyen<sup>6</sup>, Michel Nuevo<sup>28</sup>, Joseph A. Nuth III<sup>1</sup>, 大場康弘<sup>29</sup>, Eric T. Parker<sup>1</sup>, Tanya S. Peretyazhko<sup>6,21</sup>, Scott A. Sandford<sup>28</sup>, Ewerton Santos<sup>20</sup>, Philippe Schmitt-Kopplin<sup>8,23,24</sup>, Frederic Seguin<sup>1,10</sup>, Danielle N. Simkus<sup>1,9,10</sup>, Anique Shahid<sup>8,30</sup>, 高野淑識<sup>22,31</sup>, Kathie L. Thomas-Keprta<sup>6,32</sup>, Havishk Tripathi<sup>1,33</sup>, Gabriella Weiss<sup>1,13</sup>, Yuke Zheng<sup>17,18</sup>, Nicole G. Lunning<sup>6</sup>, Kevin Righter<sup>34</sup>, Harold C. Connolly Jr.<sup>4,35,36</sup> & Dante S. Lauretta<sup>4</sup> (<sup>1</sup>Solar System Exploration Division, NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), <sup>2</sup>Earth and Planets Laboratory, Carnegie Institution for Science, Washington, <sup>3</sup>Department of Geosciences, Pennsylvania State University, <sup>4</sup>Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, <sup>5</sup>Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, <sup>6</sup>Astromaterials Research and Exploration Science Division, NASA Johnson Space Center, <sup>7</sup>NASA Headquarters, <sup>8</sup>Center for Astrochemical Studies, Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, <sup>9</sup>Department of Chemistry, Catholic University of America, <sup>10</sup>Center for Space Sciences and Technology, University of Maryland, <sup>11</sup>ERC, Inc., JETS/Jacobs, <sup>12</sup>California State University San Marcos, <sup>13</sup>Center for Space Sciences and Technology, University of Maryland, <sup>14</sup>東北大学, <sup>15</sup>Space Science Laboratory, University of California, Berkeley, <sup>16</sup>Southwest Research Institute, <sup>17</sup>Robert A. Pritzker Center for Meteoritics and Polar Studies, Negaunee Integrative Research Center, Field Museum of Natural History, <sup>18</sup>Department of the Geophysical Sciences, University of Chicago, <sup>19</sup>Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, <sup>20</sup>Department of Earth, Environmental, and Planetary Science, Brown University, <sup>21</sup>Amentum, JSC Engineering and Technical Support (JETSII) Contract, NASA Johnson Space Center, <sup>22</sup>海洋研究開発機構, <sup>23</sup>Technical University Munich, <sup>24</sup>Research Unit Analytical Biogeochemistry, Helmholtz Munich, <sup>25</sup>National Museum of Natural History, Smithsonian Institution, <sup>26</sup>Oak Ridge Associated Universities, <sup>27</sup>九州大学, <sup>28</sup>NASA Ames Research Center, <sup>29</sup>北海道大学, <sup>30</sup>Department of Physics, Technische Universität München, <sup>31</sup>慶應義塾大学, <sup>32</sup>Barrios, JETS/Jacobs, <sup>33</sup>Southeastern Universities Research Association, <sup>34</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, University of Rochester, <sup>35</sup>Department of Geology, School of Earth and Environment, Rowan University, <sup>36</sup>Department of Earth and Planetary Science, American Museum of Natural History)

雑誌名 *Nature Astronomy* (天文・宇宙科学の専門誌)

DOI 10.1038/s41550-024-02472-9

公表日 2025年1月30日(木) (オンライン公開)

## お問い合わせ先

北海道大学低温科学研究所 准教授 大場康弘（おおばやすひろ）

T E L 011-706-5500 F A X 011-706-7142 メール oba@lowtem.hokudai.ac.jp

U R L <https://www2.lowtem.hokudai.ac.jp/astro/oba/index1.html>

海洋研究開発機構生物地球化学センター ポストドクトラル研究員 古賀俊貴（こがとしき）

T E L 046-867-9805 メール toshikikoga@jamstec.go.jp

U R L <https://www.jamstec.go.jp/>

海洋研究開発機構生物地球化学センター 上席研究員／慶應義塾大学先端生命科学研究所 特任准教授/同大学院政策・メディア研究科 特任准教授 高野淑識（たかのよしのり）

T E L 046-867-9802 メール takano@jamstec.go.jp

U R L <https://www.jamstec.go.jp/>

東北大学大学院理学研究科 准教授 古川善博（ふるかわよしひろ）

T E L 022-795-3453 メール furukawa@tohoku.ac.jp

U R L <https://sites.google.com/view/tohoku-origin-of-life/>

## 配信元

北海道大学社会共創部広報課（〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目）

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

東北大学大学院理学研究科広報・アウトリーチ支援室（〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3）

T E L 022-795-6708 メール sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp

慶應義塾大学先端生命科学研究所渉外担当（〒997-0017 山形県鶴岡市大宝寺日本国403-1）

T E L 0235-29-0802 メール pr2@iab.keio.ac.jp

九州大学総務部広報課（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

T E L 092-802-2130 F A X 092-802-2139 メール koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

## 【参考図】

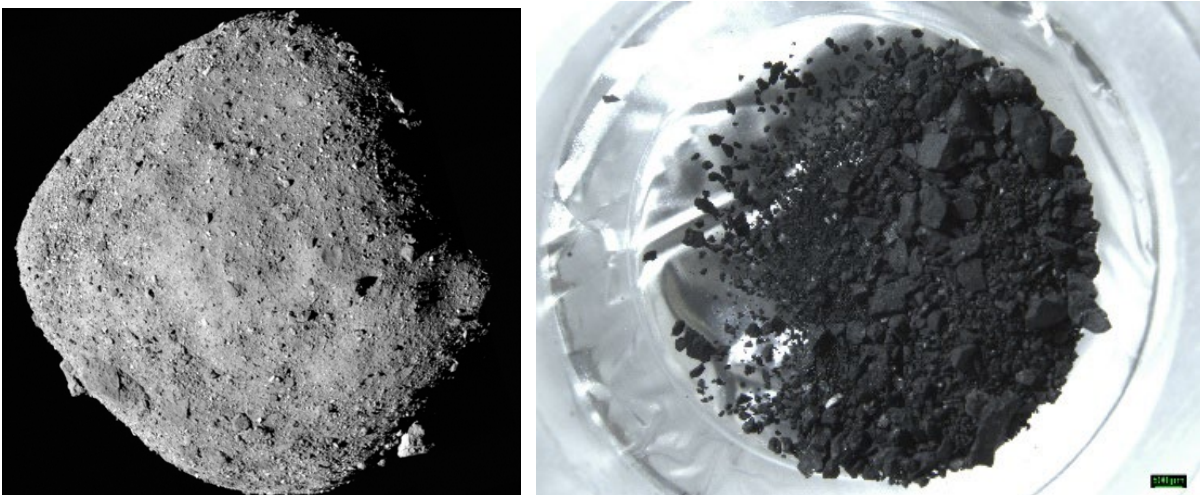


図 1. 小惑星ベヌー（左。©NASA）と分析に用いた試料（OREX-800044-101）の光学顕微鏡写真（右）。スケールバーは 500  $\mu$ m。

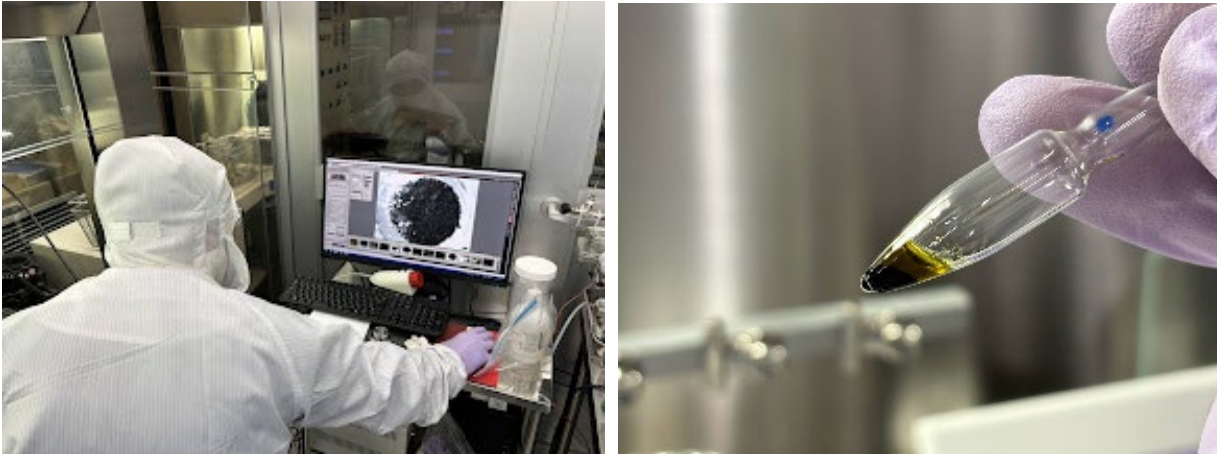


図 2. 左：九州大学大学院理学研究院 地球惑星科学部門のクリーンルーム実験室における分析の様様。  
右：塩酸とともに加熱したベヌー試料。



図 3. アミノ酸の右手・左手構造の概念図。

**【用語解説】**

\*1 窒素複素環化合物 … DNA や RNA を構成している核酸塩基のように窒素原子が環状化合物の基本骨格の一部を構成する有機化合物群のこと。