



## 小惑星ベヌー試料から核酸塩基と高濃度の尿素を検出

～小惑星環境での化学プロセスの絞り込みに成功～

### ポイント

- ・小惑星ベヌーから持ち帰られたサンプルから核酸塩基など窒素を含む多種の有機分子を検出。
- ・多くの有機分子は低温環境における高濃度アンモニア及び尿素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。

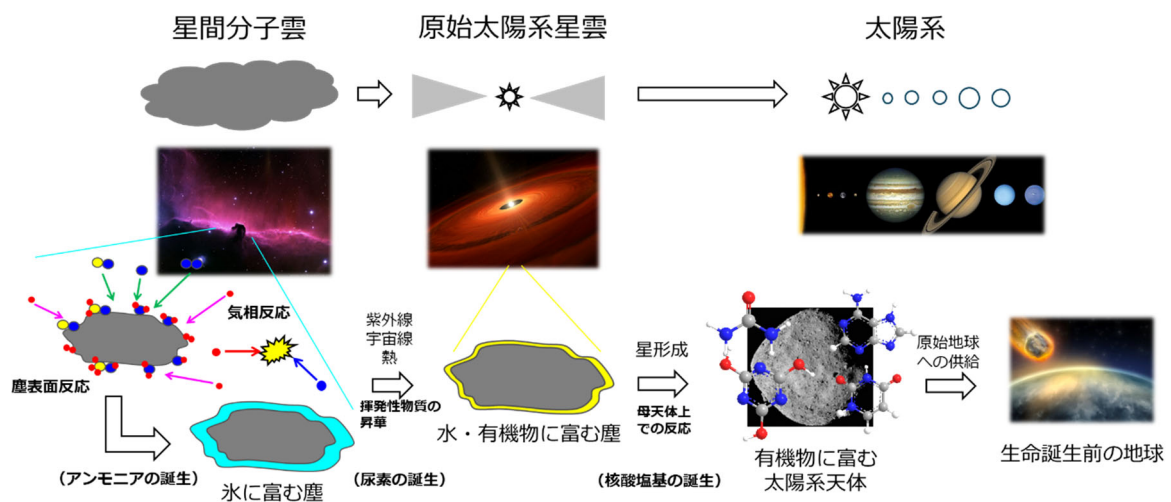
### 概要

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古賀俊貴ポスドクトラル研究員、高野淑識上席研究員、九州大学大学院理学研究院の奈良岡浩教授（研究当時）、東北大学大学院理学研究科の古川善博教授らが所属する国際研究グループは、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、地球生命に必須の核酸塩基全 5 種を含む、合計 38 種の窒素複素環化合物<sup>\*1</sup>、及び高濃度の尿素<sup>\*2</sup>の検出に成功しました。

小惑星サンプルリターン計画「OSIRIS-REx」では、炭素質小惑星ベヌーで採取した試料（計 121.6 グラム）の分析が順調に進んでおり、既報（Glavin et al. 2025, Nature Astronomy）では、アミノ酸や核酸塩基など多様な有機物組成の存在を明らかにしました。

今回、ともに遺伝子 RNA、DNA の構成成分である糖化合物及び核酸塩基類の詳細分析用として、約 600 ミリグラムの試料が日本の研究グループに配分されました。同一の試料からすでに、小惑星リターンサンプルでは初めてとなるリボースやグルコースなどの糖類が検出されています（Furukawa et al. 2026, Nature Geoscience）。今回の含窒素化合物の分析では、核酸塩基全 5 種を含む窒素複素環化合物 38 種（前述既報では 20 種）、及びアミノ酸や核酸塩基の合成材料の一つとして知られる尿素が検出されました。検出された窒素複素環化合物の種類はこれまでに分析されたどの地球外物質よりも多く、今回初めて検出された分子も含まれました。尿素は窒素複素環化合物の合計より 8 倍以上多く、ベヌー試料中に存在する単一の含窒素化合物として、アンモニア、メチルアミンについて 3 番目に多いことが分かりました。これは、検出された有機化合物が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先行研究での知見を支持するとともに、小惑星ベヌー上での核酸塩基の生成過程として尿素を材料とした反応経路が支配的であったことを強く示唆します。さらにリボースと核酸塩基が同一サンプル内に存在するという結果は、生命誕生前の小惑星環境で RNA の主成分の大半が生成可能であることを示し、それらが原始地球上に供給されていたことを強く期待させます。

なお、本研究結果は、2026 年 4 月 2 日（木）公開の Communications Chemistry 誌（英科学誌 Nature の姉妹紙）の特集号、「Prebiotic Chemistry」にオンライン掲載されました。



小惑星ベヌーで検出された核酸塩基誕生までの宇宙における化学進化、及び地球への有機物供給に関する概念図 (©NASA、国立天文台)。

## 【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、日本の研究グループに配分されたベヌー試料約600ミリグラムに含まれる、核酸塩基など窒素を含む有機化合物の分析を行いました。

## 【研究手法】

およそ600ミリグラムのベヌー試料をガラスアンプル管内で2%希塩酸を用いて超音波抽出し、抽出液を試料から分離しました。抽出残渣試料にさらに20%濃塩酸を加えてガラスアンプル管内に封入し、110°Cで12時間加熱しました。加熱後、抽出液を試料から分離して、各抽出液に含まれる金属イオンを除去、その後核酸塩基などの溶存成分を液体クロマトグラフ-超高分解能質量分析計で分析しました。さらに検出された分子の生成プロセス解明に資する実験室内模擬実験も遂行しました。

## 【研究成果】

各抽出液から生命の遺伝子に用いられている全5種の核酸塩基（シトシン、ウラシル、チミン、アデニン、グアニン、図2）を含む窒素複素環化合物が合計38種類検出され（これまでの地球外物質分析では20種程度）、そのうちの少なくとも4種がこれまでの地球外物質分析では未同定の化学種でした。生命材料となる5種の核酸塩基の中ではRNAにのみ用いられるウラシルが最も多いことが分かりました（試料1グラムあたり約55ナノグラム：ナノ=10<sup>-9</sup>）。同一のベヌー試料からRNAの構成成分であるリボースも検出されていること（Furukawa et al. 2026, Nature Geoscience）とともに、本成果は生命誕生前の化学進化でRNAが重要な働きをしたとするRNAワールド仮説を支持する結果だといえます。一方、核酸塩基と糖が結合した化合物、ヌクレオシド\*<sup>3</sup>の存在は本分析条件下では確認することができませんでした。この結果は、小惑星ベヌー上での低温反応環境は、ヌクレオシド合成にまで到達していなかったことを示唆します。

窒素複素環化合物に加えて、生体の代謝産物としても知られる尿素が高濃度で検出されました。尿素の濃度は試料 1 グラムあたり約 10 マイクログラム (マイクロ =  $10^{-6}$ ) であり、窒素複素環化合物全体の約 8 倍、そしてベヌー試料中で検出された窒素を含む化合物の中で、アンモニア等について 3 番目に多い化学種でした。尿素はアンモニアに富む低温環境で容易に生成可能であり、さらにウラシルをはじめとする核酸塩基合成の材料として知られているため、ベヌー試料中の核酸塩基の合成経路として、アンモニアと尿素に富む塩基性低温環境での化学反応プロセスが非常に有力です。これは、他に検出されている化合物の中で、尿素骨格をその構造内に有する化学種 (ウラシル、2-ヒドロキシピリミジン、シアヌル酸など) の存在量が高いという結果と整合的です (図 3)。

また、本研究では小惑星ベヌー母天体環境を模擬した熱水反応実験を遂行し、低温環境での化学プロセスだけでなく、比較的暖かい環境での化学プロセスも、試料中の有機化合物分布に影響している可能性が見出されました。

これらの知見は、600 ミリグラムという大量の試料を使用できる利点を最大限駆使して得られた成果であり、今後の小惑星環境での前生物的化学プロセスの解明に向けた大きな前進だといえます。

### 【今後への期待】

「宇宙で分子はどのように複雑化できたのか」「宇宙で誕生した有機分子はどのようなものがどれほど地球上に供給されたのか」—これらの情報は地球上での生命の起源という科学における最大の謎を紐解くうえでカギとなる極めて重要なものです。そうした情報を得るためには、今回分析した小惑星ベヌー試料やすでに分析された小惑星リュウグウ試料など、地球上での汚染の影響が最小限の地球外物質、及びこれまでに地球に落下した炭素質隕石の分析と、それにより得られる結果の正確な評価が不可欠です。今後さらにこれら地球外試料に含まれる有機化合物など生命関連分子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、地球上での生命の起源の謎解明に近づいていくことが期待できます。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、本研究で培った微小試料分析技術や地球外有機分子に関する知見が必ずそれらの成功に役立つと確信しております。

### 【謝辞】

本研究は、JSPS 科研費 JP21H04501、JP23H03980、JP25H00677 の助成、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 Distribution of extraterrestrial nucleobases, other N-heterocycles, and their precursors in a sample from asteroid Bennu (小惑星ベヌーサンプルに含まれる核酸塩基、その他窒素複素環化合物、及びそれらの前駆体の分布)

著者名 大場康弘<sup>1</sup>、古賀俊貴<sup>2</sup>、高野淑識<sup>2,3</sup>、奈良岡浩<sup>4</sup> (研究当時)、平川祐太<sup>2</sup>、角南沙己<sup>5</sup>、古川善博<sup>5</sup>、山崎智也<sup>1</sup>、都丸琢斗<sup>1</sup>、Jason P. Dworkin<sup>6</sup>、Daniel P. Glavin<sup>6</sup>、Harold C. Connolly Jr.<sup>7,8,9</sup>、Dante S. Laurotta<sup>7</sup> (<sup>1</sup>北海道大学低温科学研究所、<sup>2</sup>海洋研究開発機構、<sup>3</sup>慶應義塾大学、<sup>4</sup>九州大学、<sup>5</sup>東北大学、<sup>6</sup>Solar System Exploration Division, NASA Goddard Space Flight Center (GSFC)、<sup>7</sup>Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona、<sup>8</sup>Department of Geology, School of Earth and Environment, Rowan University、<sup>9</sup>Department of Earth and Planetary Science, American Museum of Natural History)

雑誌名 Communications Chemistry (化学の専門誌)

D O I 10.1038/s42004-026-01966-z

公表日 2026年4月2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 046-866-3811 メール toshikikoga@jamstec.go.jp

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

## 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

海洋研究開発機構海洋科学技術戦略部報道室 (〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25)

T E L 045-778-5690 メール press@jamstec.go.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

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

【参考図】

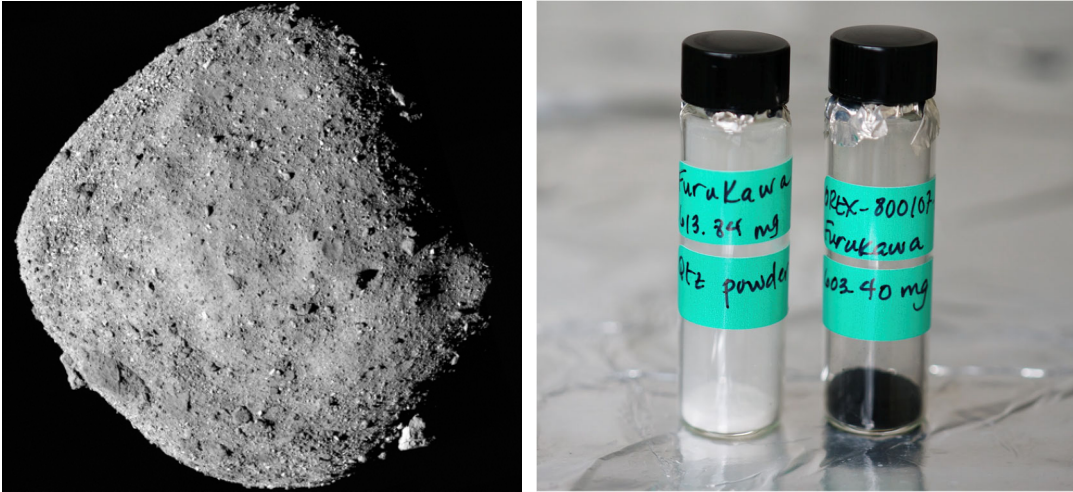


図 1. 小惑星ベヌー（左。©NASA）と分析に用いた試料（OREX-800107-108、黒色）と操作ブランク検用の二酸化ケイ素粉末（白色）の写真。

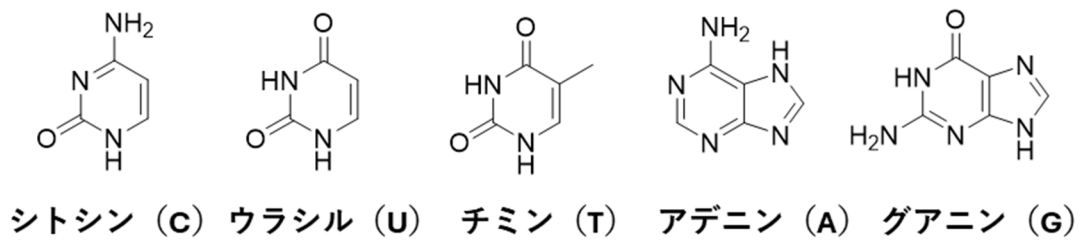


図 2. ベヌー試料から検出された、地球生命の遺伝子、RNA と DNA にも使われる核酸塩基 5 種。

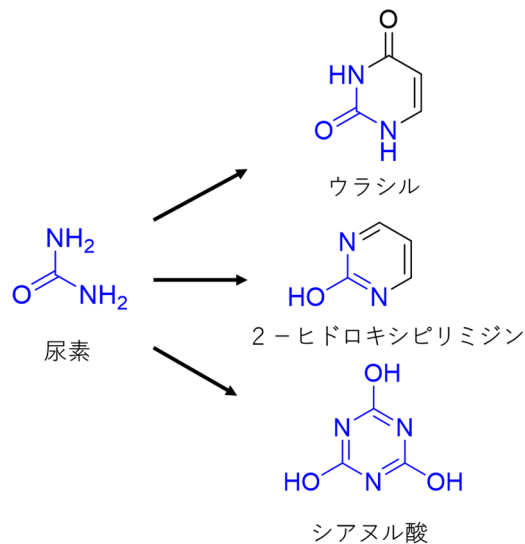


図 3. 尿素及び尿素が材料となったと考えられる、ベヌー試料から検出された代表的な窒素複素環化合物の構造。尿素骨格を青でハイライトしている。

**【解説】**

- \*1 窒素複素環化合物 … 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のこと。
- \*2 尿素 … 1828年にヴェーラーによって人間の手で初めて無機化合物から合成された有機化合物といわれており、生体の代謝産物としても知られる。
- \*3 ヌクレオシド … 核酸塩基と糖が結合した化合物で、これにリン酸が結合すると、DNAやRNAを構成するヌクレオチドになる。これまでに地球外物質から検出された例はない。