

小惑星ベヌーから太陽系最初期の岩石を発見

～リュウグウとの天体材料の共通性を示唆～

ポイント

- ・小惑星「ベヌー」試料から、太陽系最初期に形成された岩石状物質を複数発見。
- ・そのうち一つについて、太陽系誕生直後の約 45 億 6,730 万年前に形成されたことを解明。
- ・「ベヌー」と「リュウグウ」が、太陽系遠方で似た材料からできた可能性を示唆。

概要

北海道大学大学院理学研究院の川崎教行准教授、同大学総合イノベーション創発機構の坂本直哉准教授、京都大学白眉センターの松本 徹特定助教、海洋研究開発機構の荒川創太研究員らの研究グループは、アメリカ航空宇宙局（NASA）の小惑星探査機「OSIRIS-REx」が小惑星「ベヌー」から採取した試料中から、太陽系最初期に形成された岩石状物質である難揮発性包有物*¹を複数発見しました。

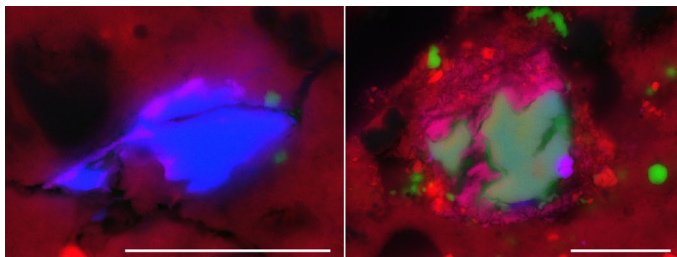
小惑星「ベヌー」は、宇宙航空研究開発機構の小惑星探査機「はやぶさ 2」が試料を持ち帰った小惑星「リュウグウ」と同じく、水を含む鉱物や有機物に富む炭素質の小惑星です。これらの小惑星は、水や有機物の起源、さらには惑星が形成された過程を理解するうえで重要な研究対象です。しかし、「ベヌー」を形成した最初期の固体物質（ベヌーのもとになった材料）がどのようなものであったのか、またそれが「リュウグウ」の材料とどの程度似ているのかは不明でした。

本研究では、「ベヌー」試料から、初期太陽系の高温領域で形成された難揮発性包有物を複数発見し、その特徴を詳しく調べました。さらに、そのうち一つについて、北海道大学の同位体顕微鏡（二次イオン質量分析計）を用いた Al-Mg 放射年代測定法*²により年代測定を行い、太陽系誕生直後の約 45 億 6,730 万年前に形成された物質であることを明らかにしました。

今回発見された「ベヌー」の難揮発性包有物はいずれも小さく、小惑星「リュウグウ」から見つかったものとよく似ていました。一方で、多くの炭素質隕石に見られるような大型の難揮発性包有物は、「ベヌー」からはこれまで見つかっていません。このような大きさの違いは、初期太陽系における固体物質の輸送や選別過程を反映していると考えられます。

本研究の成果は、「ベヌー」と「リュウグウ」が、太陽系遠方で似た材料からできた可能性を示すものです。別々の探査機によって持ち帰られた二つの小惑星試料に共通する特徴が見つかったことで、太陽系初期の物質輸送や天体形成過程の理解がさらに進むことが期待されます。

なお、本研究成果は、2026 年 7 月 18 日（土）公開の Nature Communications 誌にオンライン掲載されました。



小惑星「ベヌー」から見つかった難揮発性包有物の例。そのうち一つ（左）は、太陽系誕生直後の約 45 億 6,730 万年前に形成されたことが判明。データは Mg(赤)—Ca(緑)—Al(青)の合成 X 線元素マップ。スケールバーは 0.01 ミリメートル。

(©Kawasaki et al. 2026)

【背景】

小惑星「ベヌー」と「リュウグウ」は、水を含む鉱物や有機物に富む炭素質の小惑星です。これらの小惑星は、太陽系初期の姿をよく残していると考えられており、水や有機物の起源、さらには惑星が形成された過程を理解するうえで重要な研究対象です。アメリカ航空宇宙局（NASA）の小惑星探査機「OSIRIS-REx」と宇宙航空研究開発機構の小惑星探査機「はやぶさ2」によって、これら二つの小惑星の試料が地球に持ち帰られ、両者を直接比較できるようになりました。

これまでの研究により、「ベヌー」や「リュウグウ」の現在の主要な構成物質は、母天体内部で氷が溶けて生じた水溶液との反応によって作られた鉱物であることが分かってきました。一方で、これらの小惑星を作った最初期の固体物質、すなわち水溶液との反応を受ける前の原材料物質がどのようなものであったのか、またそれらの材料が太陽系のどこで集まったのかは、十分には明らかになっていませんでした。

研究グループはこれまでに、「リュウグウ」試料から見つかった難揮発性包有物の年代測定に成功し、「リュウグウ」には太陽系誕生直後に形成された原材料物質が含まれていることを明らかにしてきました。難揮発性包有物は、初期太陽系の高温領域で形成された岩石状物質であり、太陽系で最も古い固体物質の一つです。そのため、難揮発性包有物を調べることは、小惑星の原材料物質がいつ形成され、どのように運ばれ、どこで集まったのかを知る重要な手がかりになります。

しかし、「ベヌー」試料中に含まれる難揮発性包有物がどのような特徴を持つのか、またそれが「リュウグウ」のものとのどの程度似ているのかは不明でした。そこで本研究では、「ベヌー」試料中の難揮発性包有物を探索し、その特徴と年代を調べることで、「ベヌー」と「リュウグウ」の原材料物質の共通性と、それらが集まった場所を明らかにすることを目指しました。

【研究手法】

電子顕微鏡などによって、「ベヌー」試料中の鉱物の形や化学組成を調べ、初期太陽系の高温領域で形成された岩石状物質である難揮発性包有物を探索しました。さらに、北海道大学の同位体顕微鏡（二次イオン質量分析計）を用いて、見つかった難揮発性包有物の酸素同位体組成を分析し、そのうち一つについて Al-Mg 放射年代測定法により形成年代を求めました。同位体顕微鏡は、微小な鉱物の同位体組成を高い空間分解能で調べることができる装置であり、微小領域の同位体分析や年代測定を可能にする重要な分析技術です。

【研究成果】

本研究では、「ベヌー」試料中から難揮発性包有物を 9 個発見しました。化学組成や同位体組成の分析の結果、これらは太陽系最初期に形成された物質に特徴的な性質を持つことが確認されました。さらに、そのうち一つについて Al-Mg 放射年代測定法による年代測定に成功し、太陽系誕生直後の約 45 億 6,730 万年前（ ± 10 万年）に形成されたことが明らかになりました。以上のデータは、「ベヌー」試料中に、太陽系最初期に形成された原材料物質が含まれていることを示しています。

今回発見された「ベヌー」の難揮発性包有物はいずれも小さく、大きさは 0.1 ミリメートル以下でした。この特徴は、「リュウグウ」試料や同型の隕石（イブナ型炭素質隕石*3）から見つかった難揮発性包有物とよく似ています。一方で、他の多くの炭素質隕石では、より大型（約 0.1～10 ミリメートル、またはそれ以上）の難揮発性包有物が見つかっています。したがって、「ベヌー」と「リュウグウ」は、大型の難揮発性包有物に乏しく、小型のものを含むという共通した特徴を持つことが分かりました。

このような大きさの違いは、初期太陽系における固体物質の輸送や選別過程を反映していると考えられます。大きな難揮発性包有物は、初期太陽系のガス円盤内を移動中に、原始木星付近に形成された圧力バンプ*⁴にせき止められた可能性があります。一方で、小さな難揮発性包有物は円盤内に広く分布し、その一部が「ベヌー」や「リュウグウ」の母天体に取り込まれたと考えられます（図1）。本研究の結果は、「ベヌー」と「リュウグウ」が、太陽系遠方で似た材料からできたことを示唆します。

【今後への期待】

本研究により、「ベヌー」と「リュウグウ」には、太陽系最初期に形成された小さな難揮発性包有物が共通して含まれていることが明らかになりました。これは、二つの小惑星が太陽系遠方で似た材料からできた可能性を示す重要な手がかりです。今後は、原材料物質だけでなく、「ベヌー」や「リュウグウ」の母天体そのものがいつ形成されたのかを調べ、両者の形成史を比較することが重要になります。これにより、水や有機物に富む小惑星の起源と進化の理解がさらに進むと期待されます。

【謝辞】

本研究は、NASA 契約 NNM10AA11C、日本学術振興会 (JSPS) 科研費 JP24KK0072・JP25H00678、並びに公益財団法人日揮・実吉奨学会 2024 年度研究助成の支援を受けて実施されました。

論文情報

論文名	Refractory inclusions in Bennu samples indicative of outer Solar System accretion (小惑星ベヌー試料中の難揮発性包有物が示す外側太陽系での集積)
著者名	川崎教行 ^{1*} 、松本 徹 ^{2,3} 、荒川創太 ⁴ 、坂本直哉 ⁵ 、馬上謙一 ¹ 、Sara S. Russell ⁶ 、Jessica J. Barnes ⁷ 、Ann N. Nguyen ⁸ 、Timothy J. McCoy ⁹ 、Pierre Haenecour ⁷ 、坂本尚義 ¹ 、Harold C. Connolly Jr. ^{7,10,11} 、Dante S. Lauretta ⁷ (¹ 北海道大学大学院理学研究院、 ² 京都大学白眉センター、 ³ 京都大学大学院理学研究科、 ⁴ 海洋研究開発機構数理科学・先端技術研究開発センター、 ⁵ 北海道大学総合イノベーション創発機構、 ⁶ ロンドン自然史博物館、 ⁷ アリゾナ大学、 ⁸ NASA ジョンソン宇宙センター、 ⁹ スミソニアン国立自然史博物館、 ¹⁰ ローワン大学、 ¹¹ アメリカ自然史博物館) (*責任著者)
雑誌名	Nature Communications (自然科学全般を扱う国際総合誌)
D O I	10.1038/s41467-026-73868-6
公表日	2026 年 7 月 18 日 (土) (オンライン公開)

【参考図】

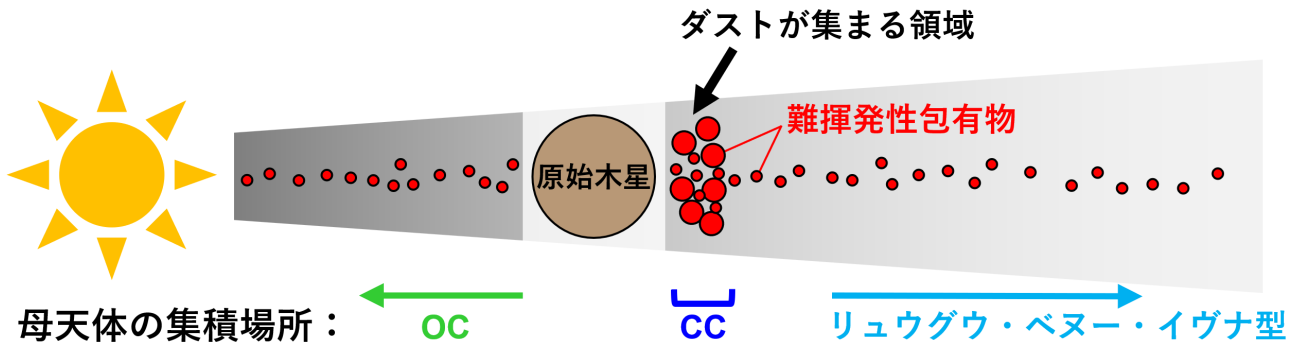


図 1. 「ベヌー」と「リュウグウ」の母天体の集積領域を示す模式図。大型の難揮発性包有物は、ガス円盤内を移動中に原始木星付近の圧力バンプにせき止められた可能性がある。一方で、小型の難揮発性包有物は円盤内に広く分布し、その一部が「ベヌー」や「リュウグウ」の母天体に取り込まれたと考えられる。この特徴は、二つの小惑星が太陽系遠方で似た材料からできたことを示唆する。CC は炭素質コンドライト（炭素質隕石）、OC は普通コンドライト、イヴナ型はイヴナ型炭素質隕石を示す。

【用語解説】

- * 1 難揮発性包有物 … 初期太陽系の高温領域で形成された岩石状物質。カルシウムやアルミニウムに富む鉱物からなる CAI（カルシウム・アルミニウムに富む包有物）や、高温で形成されたかんらん石などからなる AOA（アメーバ状かんらん石集合体）などがある。
- * 2 Al-Mg 放射年代測定法 … 放射性同位体 Al-26 が半減期約 70 万年で Mg-26 に壊変することを利用した年代測定法。太陽系最初期に形成された物質の年代を精密に調べることができる。
- * 3 イヴナ型炭素質隕石 … 炭素質隕石の一種で、CI コンドライトとも呼ばれる。水を含む鉱物や有機物に富み、化学組成が太陽の組成に近いことから、太陽系を作った平均的な材料をよく反映する隕石と考えられている。
- * 4 圧力バンプ … 初期太陽系のガス円盤内で、ガスの圧力が局所的に高くなる領域のこと。固体物質の移動を妨げ、特定の場所に集まりやすくする働きがある。巨大惑星の形成によって生じる場合がある。