

2023年11月9日

東京工業大学

東京大学大学院理学系研究科

北海道大学

リュウグウ起源天体の水循環が作り出すクロム同位体不均質

－小惑星帰還試料の同位体分析における重要な指針を提示－

【要点】

- 「リュウグウ」から採取した岩石試料に、クロム同位体組成の局所的な不均質が存在。
- 不均質の原因は、太陽系形成から約 520 万年後にリュウグウ母天体で生じた水質変成に伴う水循環と二次鉱物の沈殿と推察。
- 小惑星の本来の同位体組成を知るには、一定量の均質試料の分析が必要。

【概要】

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飯塚毅准教授と橘省吾教授、北海道大学 大学院理学研究院の塚本尚義教授らの研究グループは、**Cb 型小惑星**（用語 1）「リュウグウ」の**同位体組成**（用語 2）を測定し、リュウグウで生じた激しい水質変成と水循環により、クロム同位体組成の局所的な不均質が生じたことを突き止めた。

リュウグウ試料の初期分析により、Cb 型小惑星「リュウグウ」は**イヴナ型炭素質隕石**（用語 3）に似た化学組成や鉱物組成を持つことが明らかとなったが、クロムの**核合成起源同位体異常**（用語 4）については、リュウグウとイヴナ型炭素質隕石の間にわずかなズレが見られており、その原因究明が待たれていた。

研究グループは、計 5 つのリュウグウ試料を対象に、クロム (^{54}Cr) とチタン (^{50}Ti) の核合成起源同位体異常を測定した。その結果、 ^{54}Cr 同位体異常はイヴナ型隕石の平均値より高い値から低い値まで、有意な変動が見られた。この変動は、**短寿命核種**（用語 5）であるマンガン-53 (^{53}Mn) の放射壊変に由来するクロム同位体 (^{53}Cr) の変動と逆相関することから、リュウグウ起源天体で生じた水質変成・水循環により ^{54}Cr が乏しい箇所と、Mn に富む炭酸塩 (^{53}Cr に富む) 箇所が生じたと考えられる。また、各々のリュウグウ試料 (7~24 mg) を合算した物質 (約 90 mg) の ^{54}Cr 同位体異常は、イヴナ型炭素質隕石の平均値と一致した。すなわち、本来の同位体組成を正しく知るには、一定の均質試料の分析が必要といえる。**OSIRIS-REx**（用語 6）が持ち帰った小惑星ベヌー試料の初期分析においても、不均質の影響を避けるために、一定量 (0.1 g 以上) の試料を用いた分析が望ましい。

本研究成果は、日本時間 2023 年 11 月 9 日に、*Science Advances* 誌にオンライン掲載された。

●背景

JAXA の探査機「はやぶさ 2」は、2020 年末、Cb 型小惑星「リュウグウ」の試料 5.4 g を地球に持ち帰った。その後行われた一連の初期分析により、リュウグウの化学組成や鉱物組成は、イヴナ型炭素質隕石とほぼ一致することが明らかとなった。イヴナ型炭素質隕石の化学組成は、地球上にある約 7 万個の隕石の中で最も太陽光球の値に近く、始原的な特徴を持つが、この隕石は現在わずか 9 個しか見つかっておらず、非常に貴重な存在である。リュウグウやイヴナ型炭素質隕石のような始原的物質をもたらした天体がいつ、どこで、どのように誕生したのかを知ることは、太陽系の成り立ちを考える上で極めて重要であり、さまざまなアプローチで研究が進められている。中でも、リュウグウや隕石の核合成起源同位体異常は、母天体の形成位置に関する情報を与えるものとして、近年、大きな注目を集めている。

研究グループはこれまでのリュウグウ初期分析において、チタン・クロム・鉄・亜鉛の核合成起源同位体異常を測定し、リュウグウに似た同位体的特徴を持つのはイヴナ型炭素質隕石のみであることを突き止めた。このことから、リュウグウやイヴナ型炭素質隕石の起源天体は、他の隕石起源天体とは異なり、より遠方の太陽系縁辺部で誕生したことが推察された。しかし、この 4 元素のうち、クロムの同位体異常については、リュウグウとイヴナ型炭素質隕石の間にわずかなズレが見られた。このズレは、両起源天体の形成場所の違いを反映しているのか、それとも何か別の理由があるのか、原因究明が待たれていた。そこで研究グループは、これまでに測定されたリュウグウ試料 2 点に新たに 3 点を加え、5 点のリュウグウ試料のクロムおよびチタンの核合成起源同位体異常を測定した。同時に、これら試料を用いて、マンガンの短寿命核種 ^{53}Mn が放射壊変して作られるクロム同位体 (^{53}Cr) の分析も行った。また、2 種類のイヴナ型炭素質隕石を含む、全 6 種類の炭素質隕石についても、同様の分析を行った。

●研究手法

はやぶさ 2 が採取したリュウグウ試料、ならびに隕石試料を水溶液化し、東京工業大学の表面電離型質量分析装置（用語 7）、東京大学およびアリゾナ州立大学のマルチ検出器付き ICP 質量分析装置（用語 8）によりクロムおよびチタンの同位体組成を精密測定した。

●研究成果

リュウグウおよびイヴナ型炭素質隕石のチタン同位体異常 ($\epsilon^{50}\text{Ti}$) は、先行研究で得られたイヴナ型炭素質隕石の範囲とほぼ一致したが、クロム同位体異常 ($\epsilon^{54}\text{Cr}$) は、先行研究より低い値から高い値まで大きく変動した（図 1）。イヴナ型炭素質隕石には、極めて ^{54}Cr に富む極微小（1 μm 以下）のプレソーラー粒子（用語 9）が含まれており、その $\epsilon^{54}\text{Cr}$ の最大値は 560,000 に達する。今回分析したリュウグウやイヴナ型炭素質隕石の質量は、1 試料あたり 7~24 mg であり、先行研究が使用したイヴナ型炭素質隕石（100 mg 以上）と比べ、かなり少量である。従って、観察された $\epsilon^{54}\text{Cr}$ の変動は、 ^{54}Cr に富む微粒子が不均質分布した試料を少量測定したために生じたと考えられる（図 2：左）。

このような ^{54}Cr に富む微粒子の不均質分布には、リュウグウやイヴナ型炭素質隕石の起源天体に存在していた氷が溶けて周囲の岩石と反応を起こす「水質変成」が深く関与している。水質変成が起きると、岩石中の可溶成分が流体に溶け込んで天体内を循環し、さまざまな二次鉱物を沈殿させる。ここで、 ^{54}Cr に富む微粒子は流体に溶けにくいいため、流体は相対的に ^{54}Cr に欠乏し、低い $\epsilon^{54}\text{Cr}$ を持つようになる。その結果、二次鉱物の ^{54}Cr 含有量は少なくなり、 $\epsilon^{54}\text{Cr}$ は低くなる（図2：右）。以上のことから、 $\epsilon^{54}\text{Cr}$ が低いリュウグウやイヴナ型炭素質隕石小片試料には、より多くの二次鉱物が含まれていたと考えられる。

このシナリオは、短寿命核種 ^{53}Mn の放射壊変によって生じる娘核種、 ^{53}Cr の測定結果からも支持される。流体から沈殿した二次鉱物であるドロマイト $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ などの炭酸塩は、マンガンを多く含むため、より高い $\epsilon^{53}\text{Cr}$ を持つ。図3に見られるように、リュウグウおよびイヴナ型炭素質隕石の $\epsilon^{54}\text{Cr}$ は $\epsilon^{53}\text{Cr}$ と逆相関しており、ドロマイトの多い（ $\epsilon^{53}\text{Cr}$ の高い）試料は、流体の影響により低い $\epsilon^{54}\text{Cr}$ を持っていることが分かる。なお、 ^{53}Mn の放射壊変で生じた ^{53}Cr の量を時間に換算すると、二次鉱物の沈殿は太陽系の誕生から約 520 万年後に生じたことが分かった（図4）。

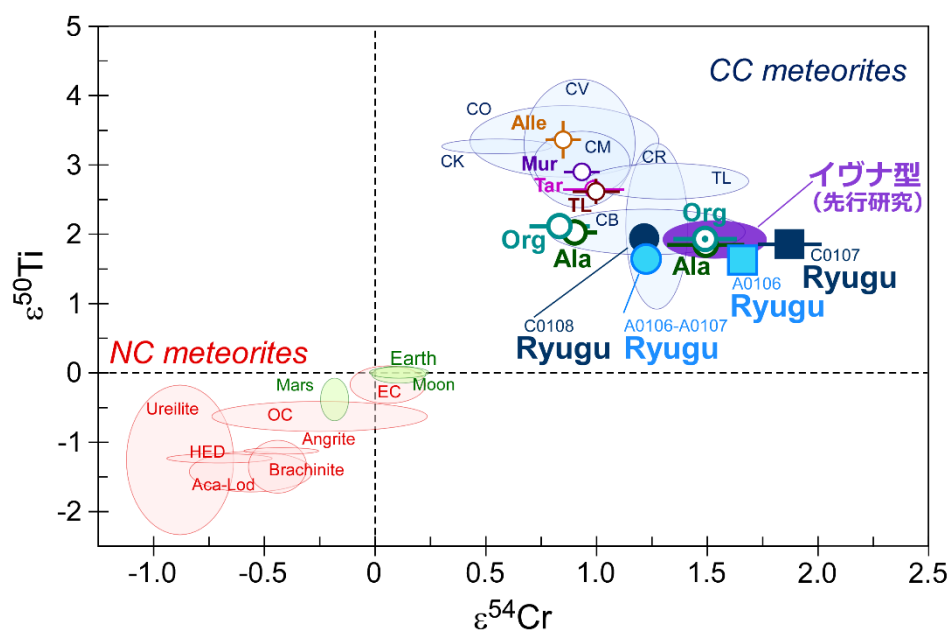


図1 本研究で測定されたリュウグウ試料（Ryugu）、イヴナ型炭素質隕石（Ala, Org）、およびその他の炭素質隕石（TL, Tar, Mur, Alle）のチタン同位体異常（ $\epsilon^{50}\text{Ti}$ ）およびクロム同位体異常（ $\epsilon^{54}\text{Cr}$ ）。リュウグウとイヴナ型炭素質隕石の $\epsilon^{50}\text{Ti}$ は先行研究で測定されたイヴナ型炭素質隕石の値（紫色の楕円）とほぼ一致するが、 $\epsilon^{54}\text{Cr}$ は先行研究より低い値から高い値まで、大きく変動する。Ala, Org, TL, Tar, Mur, Alle は隕石名の省略であり、それぞれ Alais、Orgueil、Tagish Lake、Tarda、Murchison、Allende である。なお、 $\epsilon^{50}\text{Ti}$ および $\epsilon^{54}\text{Cr}$ は、試料が持つ $^{50}\text{Ti}/^{47}\text{Ti}$ および $^{54}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$ 比の標準物質からのずれを 10,000 分率で表したものである。（© Yokoyama et al., 2023 を一部改変）

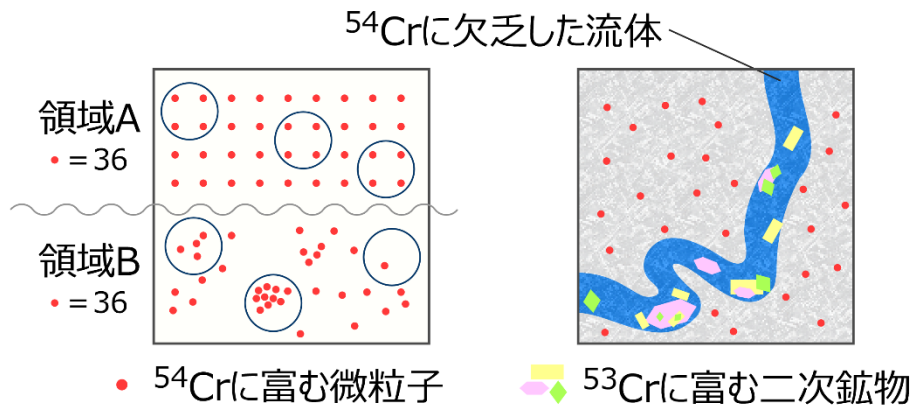


図2 (左) 領域Aのように、 ^{54}Cr に富む微粒子（プレソーラー粒子）が均質に分布していると、測定試料（円で表現）に含まれている粒子数は一定であるが、領域Bのように不均質分布していると、試料に含まれる粒子数が変動し、そのことが $\epsilon^{54}\text{Cr}$ のバラツキに反映される。なお、領域AもBも、総粒子数は36個で等しいため、領域全てを測定すれば、 $\epsilon^{54}\text{Cr}$ は同じ値となる。(右) リュウグウ起源天体の水質変成により流体が発生し、岩石中の間隙を細い水脈となって移動し、二次鉱物を沈殿させる。 ^{54}Cr に富む微粒子は流体に溶けないため、流体および二次鉱物は ^{54}Cr に欠乏し、低い $\epsilon^{54}\text{Cr}$ を持つようになる。一方、二次鉱物はMnに富むため、 ^{53}Mn の娘核種である ^{53}Cr に富む。こうして、ミリメートルスケールの局所的不均質が生じたと考えられる。

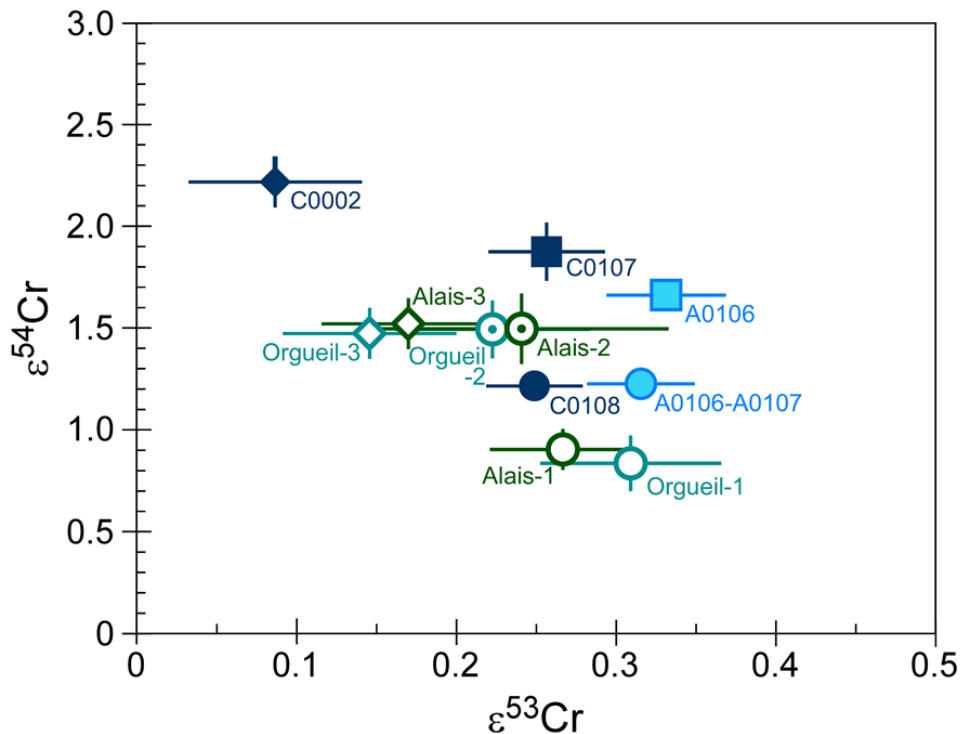


図3 リュウグウおよびイヴナ型炭素質隕石の $\epsilon^{53}\text{Cr}$ および $\epsilon^{54}\text{Cr}$ の関係。リュウグウ試料 C0002 は $\epsilon^{53}\text{Cr}$ が最も低く、 $\epsilon^{54}\text{Cr}$ が最も高い。全体的に、リュウグウおよびイヴナ型炭素質隕石の $\epsilon^{53}\text{Cr}$ と $\epsilon^{54}\text{Cr}$ は逆相関する。(© Yokoyama et al., 2023 を一部改変)

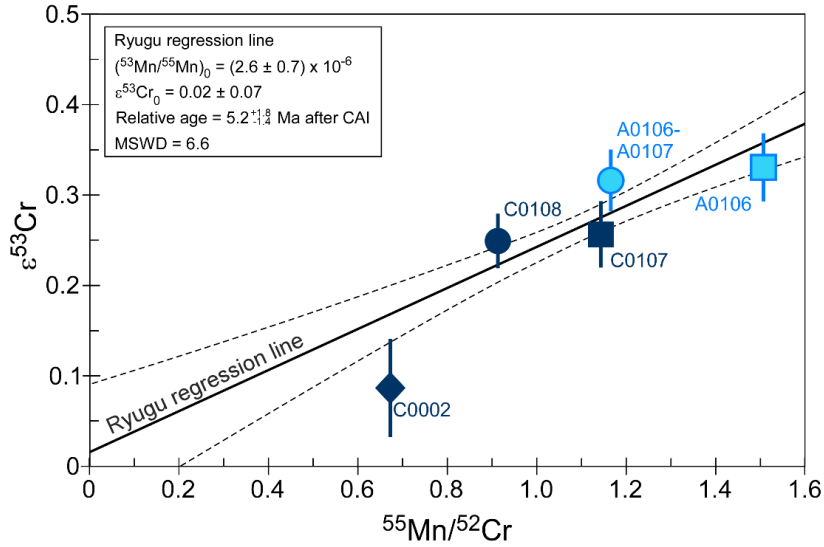


図4 リュウグウの ^{53}Mn - ^{53}Cr アイソクロン。直線 (Ryugu regression line) の傾きから、リュウグウ起源天体で生じた二次鉱物の沈殿時期が太陽系形成から 520 万年後、と計算された。点線は直線の誤差範囲 (© Yokoyama et al., 2023 を一部改変)

●社会的インパクト

今回、研究グループが測定した全リュウグウ試料を合算した物質 (約 90 mg に相当) の ^{54}Cr および ^{50}Ti 同位体異常を計算すると、先行研究によるイヴナ型炭素質隕石の平均値と一致した (図 5)。このことにより、リュウグウとイヴナ型炭素質隕石の起源天体が誕生したタイミングや場所、形成過程には多くの共通性があり、両者は親戚関係にあるというこれまでの描像を、より補強することができた。また、天体が元々持っていたクロム同位体組成を知るには、今回測定に用いた試料 (7~24 mg) のような小片試料では不十分であり、よりサイズの大きな試料の分析が必要だと言える。

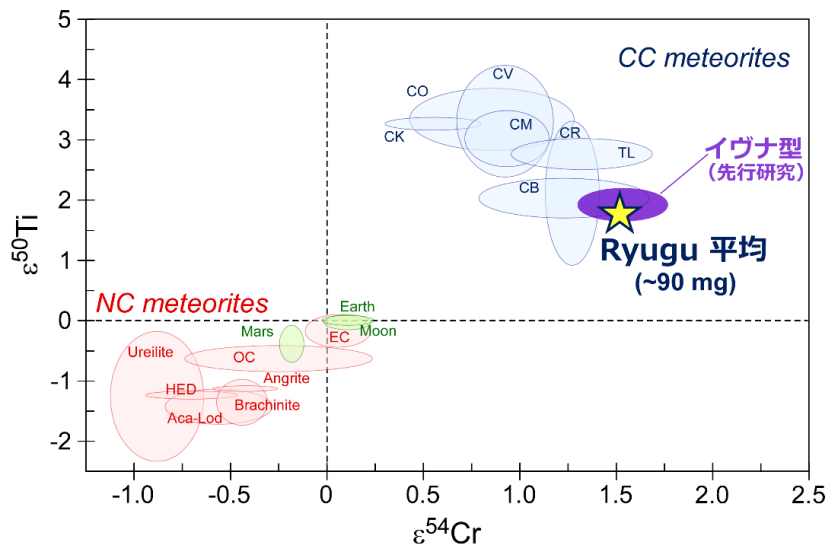


図5 今回分析された全てのリュウグウ試料を合算 (約 90 mg に相当) した場合の $\epsilon^{50}\text{Ti}$ および $\epsilon^{54}\text{Cr}$ 値。リュウグウの分析試料サイズが大きくなると、先行研究のイヴナ型炭素質隕石の値と矛盾しない。(© Yokoyama et al., 2023 を一部改変)

●今後の展開

水質変成を受けたリュウグウ試料や隕石の起源天体が本来持つ同位体組成を正しく知るには、一定の均質試料の分析が必要であるという、重要な知見が得られた。ごく最近、米国 NASA の小惑星探査機 OSIRIS-REx は、小惑星ベヌーで採取した試料を地球に持ち帰った。小惑星ベヌーはリュウグウのような C 型小惑星の仲間である B 型小惑星であり、起源天体において水質変成を受けたと考えられる。従って、これから行われるベヌー試料の初期分析においても、同位体不均質の影響を避けるためには、少なくとも 0.1 g の試料を用いて分析することが望ましい。事前の調査では、250 g のベヌー試料が採取されたとのことであり、0.1 g の分析は問題なく実施できると考えられる。また、リュウグウに関しても、より精密な「リュウグウ平均組成」を得るため、可能な限りサイズの大きな試料を用いた再分析が行われることが期待される。

【用語説明】

- (1) **Cb 型小惑星**：小惑星とは、主に火星と木星の間に存在する大きさが数 km から数百 km 程度の小天体である。小惑星を光で観測すると、表面の化学組成の違いに応じて異なる特徴（スペクトル）を示す。Cb 型はスペクトル分類の一種で、炭素を多く含む小惑星である。
- (2) **同位体組成**：元素には中性子の数が異なるため、原子 1 個あたりの重さが異なるものが存在する。例えばクロムは中性子数が 26 個、28 個、29 個、30 個の ^{50}Cr 、 ^{52}Cr 、 ^{53}Cr 、 ^{54}Cr の 4 種類が存在する。同位体組成とは、各々の同位体の存在度を表したものである。同位体組成の違いは、物質が異なる起源を持っていることの証拠となる。
- (3) **イヴナ型炭素質隕石**：イヴナ隕石に代表される隕石グループ。イヴナ隕石は 1938 年、アフリカのタンザニアに落下した隕石で、総重量は 705 g である。イヴナ型炭素質隕石は一部の元素（希ガス、炭素、窒素、リチウムなど）を除き太陽光球と同じ化学組成を示すが、このような特徴を持つ隕石はイヴナ型炭素質隕石だけである。国際隕石学会によると、地球に存在する約 70,000 個の隕石のうち、イヴナ型炭素質隕石はわずか 9 個である。
- (4) **核合成起源同位体異常**：チタンは 5 つの同位体 (^{46}Ti , ^{47}Ti , ^{48}Ti , ^{49}Ti , ^{50}Ti)、クロムは 4 つの同位体 (^{50}Cr , ^{52}Cr , ^{53}Cr , ^{54}Cr)、を持つが、これらの同位体は太陽系の形成以前に存在した恒星の進化過程で合成されたものである。それぞれの同位体には複数の供給源（超新星や赤色巨星など）があり、その供給割合のわずかな違いによって、同位体組成に違いが表れる。これを原子核合成に由来する同位体異常と呼ぶ。地球と比較したとき、リュウグウは相対的に ^{50}Ti および ^{54}Cr に富む同位体異常を持ち、一方で太陽系内側物質は ^{50}Ti および ^{54}Cr に欠乏する同位体異常を持つ。
- (5) **短寿命核種**：太陽系形成直後には存在したが、半減期が太陽系の年齢（約 46 億年）に比べて著しく短いため、現在では全て消滅してしまった核種のこと。 ^{53}Mn の半減期は 370 万年である。

- (6) **OSIRIS-REx**：米国 NASA の小惑星探査機。リュウグウ同様、水と有機物に富む C 型小惑星であるベヌーが目標天体である。2020 年 10 月 20 日、探査機はベヌー表面にタッチダウンし、試料を採取した。約 3 年後の 2023 年 9 月 24 日、探査機から投下された試料カプセルが米国ユタの砂漠で回収された。採取された試料の総量は 250 g と推定されており、現在、初期分析に向けた準備が進行中である。
- (7) **表面電離型質量分析装置**：目的元素の同位体組成を測定するための装置である。金属フィラメントに目的元素を塗布し、電流を流して加熱することで目的元素をイオン化し、磁場と電場を用いて同位体を重さごとに分け、各同位体の存在比率を精密に測定する。
- (8) **ICP 質量分析装置**：目的元素の同位体組成を測定するための装置である。アルゴンプラズマを用いて目的元素をイオン化し、磁場と電場を用いて同位体を重さごとに分け、各同位体の存在比率を精密に測定する。
- (9) **プレッシャー粒子**：太陽系の誕生前に、さまざまな星環境（赤色巨星や超新星など）においてつくられた微粒子。それぞれの星環境における元素合成過程を反映し、地球とは大きく異なる同位体組成を持つ。これまでに隕石などから見つかったプレッシャー粒子には、炭化ケイ素、グラファイト、酸化物、ケイ酸塩、ナノダイヤモンドなどがある。

【論文情報】

掲載誌：*Science Advances*

論文タイトル：Water circulation in Ryugu asteroid affected the distribution of nucleosynthetic isotope anomalies in returned sample （小惑星内部の水循環がリュウグウ試料の核合成起源同位体異常に影響を与えた）

著者：

*Tetsuya Yokoyama, Meenakshi Wadhwa, Tsuyoshi Iizuka, Vinai Rai, Ikshu Gautam, Yuki Hibiya, Yuki Masuda, Makiko K. Haba, Ryota Fukai, Rebekah Hines, Nicole Phelan, Yoshinari Abe, Jérôme Aléon, Conel Alexander, Sachiko Amari, Yuri Amelin, Ken-ichi Bajo, Martin Bizzarro, Audrey Bouvier, Richard W. Carlson, Marc Chaussidon, Byeon-Gak Choi, Nicolas Dauphas, Andrew M. Davis, Tommaso Di Rocco, Wataru Fujiya, Hiroshi Hidaka, Hisashi Homma, Peter Hoppe, Gary R. Huss, Kiyohiro Ichida, Trevor Ireland, Akira Ishikawa, Shoichi Itoh, Noriyuki Kawasaki, Noriko T. Kita, Koki Kitajima, Thorsten Kleine, Shintaro Komatani, Alexander N. Krot, Ming-Chang Liu, Kevin D. McKeegan, Mayu Morita, Kazuko Motomura, Frédéric Moynier, Izumi Nakai, Kazuhide Nagashima, Ann Nguyen, Larry Nittler, Morihiko Onose, Andreas Pack, Changkun Park, Laurette Piani, Liping Qin, Sara Russell, Naoya Sakamoto, Maria Schönbächler, Lauren Tafla, Haolan Tang, Kentaro Terada, Yasuko Terada, Tomohiro Usui, Sohei Wada, Richard J. Walker, Katsuyuki Yamashita, Qing-Zhu Yin, Shigekazu Yoneda, Edward D. Young, Hiroharu Yui, Ai-Cheng Zhang, Tomoki Nakamura, Hiroshi Naraoka, Takaaki Noguchi, Ryuji Okazaki, Kanako Sakamoto, Hikaru Yabuta, Masanao Abe, Akiko Miyazaki, Aiko Nakato, Masahiro Nishimura, Tatsuaki Okada, Toru Yada, Kasumi Yogata, Satoru Nakazawa, Takanao Saiki, Satoshi Tanaka, Fuyuto Terui, Yuichi Tsuda, Sei-ichiro

Watanabe, Makoto Yoshikawa, Shogo Tachibana, Hisayoshi Yurimoto
(*corresponding author)
DOI : 10.1126/sciadv.adi7048

【問い合わせ先】

東京工業大学 理学院 地球惑星科学系 教授
横山 哲也 (よこやま てつや)
E-mail: tetsuya.yoko@eps.sci.titech.ac.jp
TEL: 03-5734-3539
URL: <http://www.geo.titech.ac.jp/lab/yokoyama/>

東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 准教授
飯塚 毅 (いづか つよし)
TEL: 03-5841-4282
E-mail: iizuka@eps.s.u-tokyo.ac.jp

東京大学 大学院理学系研究科 附属宇宙惑星科学機構／地球惑星科学専攻 教授
橘 省吾 (たちばな しょうご)
TEL: 03-5841-4430
E-mail: tachi@eps.s.u-tokyo.ac.jp

北海道大学 大学院理学研究院 教授
塚本 尚義 (ゆりもと ひさよし)
E-mail: yuri@ep.sci.hokudai.ac.jp
TEL: 011-706-9173
URL: <http://vigarano.ep.sci.hokudai.ac.jp>

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報課
E-mail: media@jim.titech.ac.jp
TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661

東京大学 大学院理学系研究科・理学部 広報室
E-mail: media.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp
TEL: 03-5841-8856

北海道大学 社会共創部 広報課
E-mail: jp-press@general.hokudai.ac.jp
TEL: 011-706-2610 FAX: 011-706-2092