



Tokyo Tech



極地研

2021 年 3 月 2 日

報道機関各位

東京工業大学

情報・システム研究機構 国立極地研究所

消滅核種ニオブ 92 の太陽系初生存在度の決定

ー隕石の微小鉱物が記録する太陽系形成前後の元素・物質進化ー

【要点】

- 隕石の分析から消滅核種ニオブ 92 の太陽系形成時の存在度を高精度に決定
- 初期太陽系の惑星物質の進化に対して精度の良い年代測定が可能に
- 超新星爆発時の元素合成プロセスの解明に繋がる

【概要】

東京工業大学 理学院 地球惑星科学系の羽場麻希子助教、国立極地研究所の山口亮准教授、スイス連邦工科大学の Yi-Jen Lai（イージェン・ライ）博士、Jörn-Frederik Wotzlaw（ヨーン・フレデリック・ウォズロー）博士、Maria Schönbächler（マリア・シューンバヒャラー）教授、ハンガリー・コンコリー天文台の Maria Lugaro（マリア・ルガロ）上席主任研究官の研究チームは、約 46 億年前の太陽系形成時におけるニオブ 92 (^{92}Nb) の存在度（安定同位体 ^{93}Nb に対する割合）を高精度に決定した。

^{92}Nb は放射性核種であり、半減期 3700 万年でジルコニウム 92 (^{92}Zr) へ壊変する。 ^{92}Nb は初期太陽系には存在したが、現在までに壊変し尽くした消滅核種であり、その痕跡は ^{92}Zr の過剰として隕石に記録されている。太陽系形成時における ^{92}Nb の存在度の決定は、太陽系形成前後の元素・物質進化を探る上で重要である。しかし、隕石中の ^{92}Zr の過剰が非常に小さいため、 ^{92}Nb の存在度を精度良く見積もることは困難だった。

研究チームは初期太陽系で ^{92}Nb を多量に取り込んだ鉱物を隕石から発見し、 ^{92}Zr の過剰を検出することで、太陽系形成時における ^{92}Nb の存在度を高精度に決定した。この決定により、 ^{92}Nb – ^{92}Zr 放射壊変系を利用した地球外物質のより精度の良い年代測定が可能になった。また太陽系の ^{92}Nb を生成した元素合成に関し、2 つのタイプの超新星爆発（用語 1）が関与したことが明らかになった。

研究成果は 2 月 23 日（米国時間）公開の「*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*（米国科学アカデミー紀要）」電子版に掲載された。

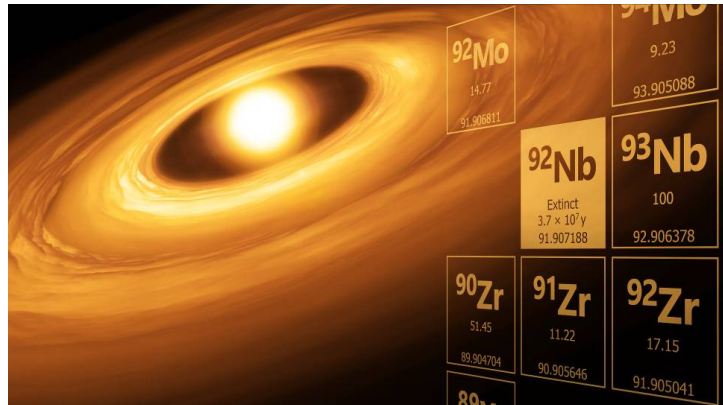


図 1. 本研究のイメージ図

隕石を用いて消滅核種ニオブ 92 の太陽系形成時の存在度を決定し、太陽系形成前後の元素・物質進化過程を解明する

●背景

太陽系は今から約 46 億年前にガスや塵からなる分子雲から誕生した。その後の約 1 億年の間に、惑星物質は衝突・破壊・合体を繰り返し、微惑星、原始惑星への成長を経て、地球の形成に至ったと考えられている。このような惑星物質のダイナミックな進化が起こった初期太陽系は太陽系の成り立ちを理解するうえで最も重要な時期であると言える。

火星と木星軌道の間の小惑星帯には、惑星に成長できなかった**微惑星**や**原始惑星**（用語 2）が生き残っており、その多くが形成時の状態を保持している。そのため、小惑星帯から飛来した隕石を分析することで、初期太陽系の情報を手に入れることができる。また、近年の同位体分析技術の発達により、隕石の分析を通して、太陽系誕生以前の元素合成の段階までアクセスすることが可能になってきた。このような研究で鍵を握るのが、消滅核種と呼ばれる放射性核種の存在である。

消滅核種は半減期 10 万年～1 億年の放射性核種であり、太陽系形成初期に存在していた核種のことを言う。消滅核種は現在の太陽系には存在しないが、消滅核種が壊変してできた娘核種を検出することで、隕石形成時における存在度を見積ることが可能である。

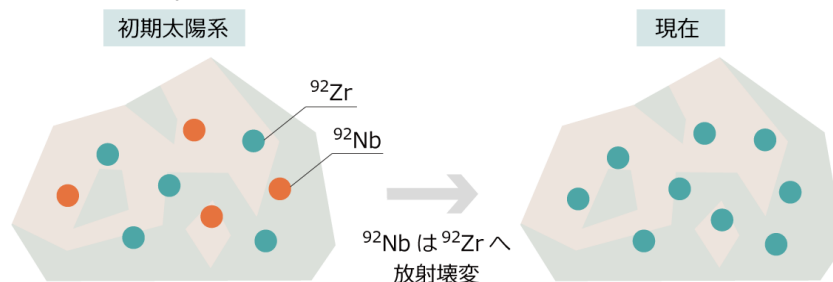


図 2. 隕石における消滅核種 ^{92}Nb の放射壊変に関する概念図

消滅核種の 1 つである質量数 92 のニオブ (^{92}Nb) は半減期 3700 万年で安定核種である質量数 92 のジルコニウム (^{92}Zr) へ壊変する (図 2)。 ^{92}Nb は超新星爆発の際に起こる **p 過程** (用語 3) によって生成される。そのため、太陽系形成時における ^{92}Nb の存在度を決定することができれば、 ^{92}Nb の元素合成モデルと併せることで、 ^{92}Nb を生成した最後の超新星爆発から太陽系形成までの期間を見積もることが可能になる (図 3)。

また、ある隕石中の ^{92}Nb の存在度を見積もることで、その隕石母天体である微惑星や原始惑星の形成年代を導くことが可能になる。しかし、隕石中における ^{92}Nb 由来の ^{92}Zr の過剰が非常に小さいため、従来の研究では ^{92}Nb 初生存在度を精度良く見積もることは困難だった。

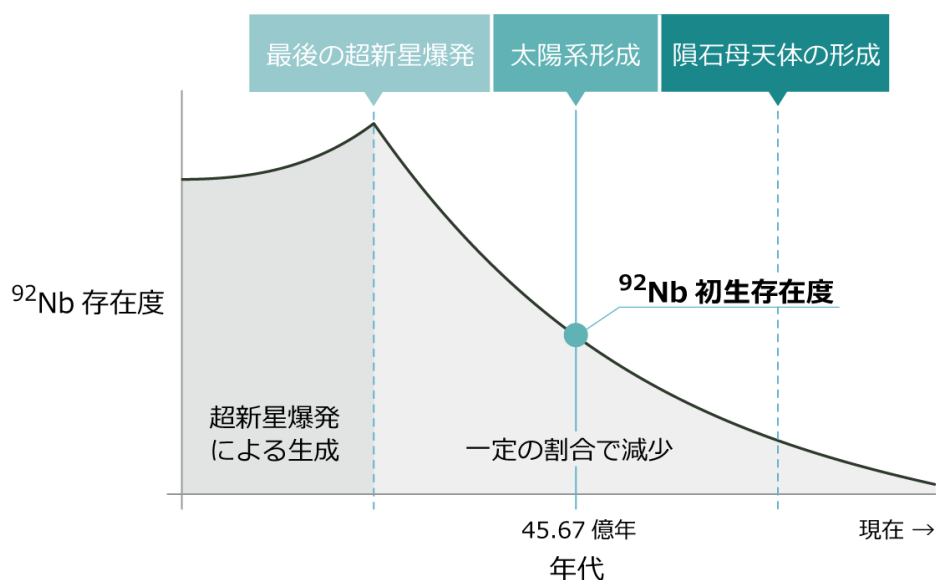


図 3. 消滅核種 ^{92}Nb の太陽系形成前後における存在度の変化

^{92}Nb は最後の超新星爆発の後、放射壊変により半減期に応じて一定の割合で減少する

●研究の着眼点と手法

^{92}Nb 初生存在度を決定するためには、まず隕石の形成年代と形成時における ^{92}Nb 存在度を実際の隕石を分析して求める必要がある。これらの値と ^{92}Nb の半減期を用いて、計算から ^{92}Nb 初生存在度を導く。

より精度の良い ^{92}Nb 初生存在度を得るためには、初期太陽系において ^{92}Nb を多量に取り込んだ鉱物を特定し、分析することが重要になる。隕石構成鉱物の中で、この条件に合致するのがチタン鉱物のルチル (TiO_2) (金紅石とも呼ばれる) である。しかし、隕石中のルチルは直径が 0.1 mm 以下と非常に小さく、ごくわずかにしか存在しないため、従来の研究では分析が困難とされてきた。

本研究では、ルチルがわずかに存在するメソシデライトという隕石に注目した。メソシデライト隕石は小惑星ベスタ（用語 4）における 45.25 億年前の大規模衝突によって中心の金属核と表層の岩石が混合し形成したと考えられている（太陽系初期における原始惑星の巨大衝突－東工大ニュース：<https://www.titech.ac.jp/news/2019/044507.html>）。メソシデライト隕石中のルチルの鉱物学的特徴および化学組成から、これらのルチルは小惑星ベスタにおける大規模衝突の際に形成し、Nb を多量に取り込んだことが明らかになった。従って、メソシデライト隕石のルチルには ^{92}Nb 由来の ^{92}Zr の大きな過剰が記録されているはずであり、ルチル形成時における ^{92}Nb 存在度を精度良く決定することが可能であると考えた。そこで本研究ではメソシデライト隕石から効率良くルチルを分離する手法を確立し、回収したルチルの Nb/Zr 比および Zr 同位体比を分析した（図 4）。

●研究成果

分析した 4 種類のメソシデライト隕石（用語 5）のルチルで、Nb/Zr 比に応じた ^{92}Zr の過剰が検出された（図 4）。これらの ^{92}Zr の過剰はルチルが形成時に ^{92}Nb を取り込んだことを示している。また、図 4 でルチルのデータが一直線上に並ぶことは、分析したメソシデライト隕石のルチルが同じタイミング、つまり小惑星ベスタでの大規模衝突の際に形成したことを示している。これらの結果から、45.25 億年前の ^{92}Nb 存在度を得ることができたため、計算により ^{92}Nb 初生存在度を決定することが可能になった。

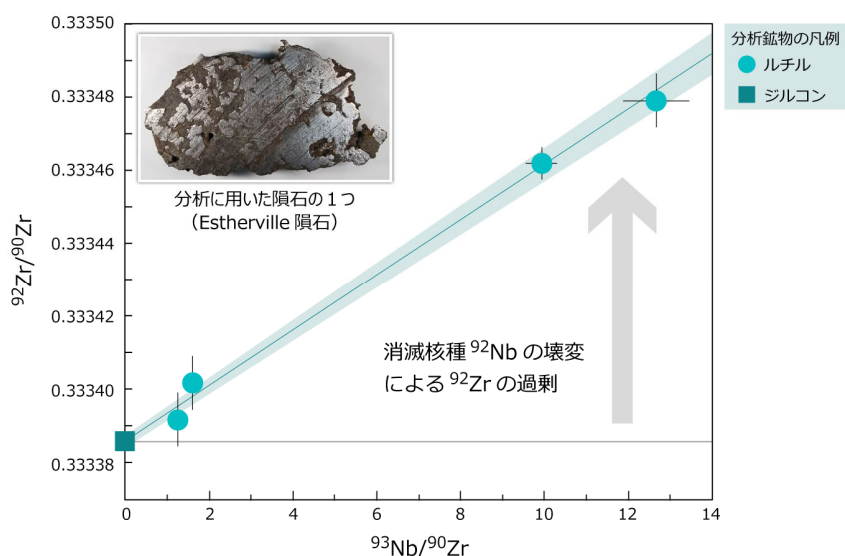


図 4. メソシデライト隕石のルチルで観測された消滅核種 ^{92}Nb の痕跡

現在のルチルには ^{92}Nb 由来の ^{92}Zr が蓄積されている。本研究では、メソシデライト隕石の微小鉱物ジルコンについても同様の分析を行った。ジルコンは Nb をほとんど取り込まないため、形成した当時の $^{92}\text{Zr}/^{90}\text{Zr}$ 比を保持している。

本研究で得られた ^{92}Nb 初生存在度は $^{92}\text{Nb}/^{93}\text{Nb} = (1.66 \pm 0.10) \times 10^{-5}$ であり、従来の見積もりと比べ、精度が 6 倍も向上した。 ^{92}Nb 初生存在度が高精度に決定されたことにより、まず ^{92}Nb – ^{92}Zr 年代測定法が利用可能となる。この年代測定法は初期太陽系の微惑星や原始惑星の進化に対して高精度の年代軸を与えることが期待される。

次に、 ^{92}Nb 初生存在度と **Ia 型超新星爆発**（用語 6）における ^{92}Nb の元素合成モデルの比較から、最後の超新星爆発から太陽系誕生までの期間を見積もった。その結果、 ^{92}Nb から見積もられた期間は 540 万年以下であり、p 過程で生成されるもう一つの消滅核種サマリウム 146 (^{146}Sm) から見積もられた期間より圧倒的に短いことが判明した。

この原因は、 ^{146}Sm が Ia 型超新星爆発で生成されたのに対し、 ^{92}Nb は Ia 型超新星爆発に加え、**II 型超新星爆発**（用語 7）でも生成されたためであると考えられる。p 過程に関しては、質量数 100 あたりの核種を境に、超新星爆発での元素合成メカニズムが異なることが理論計算から指摘されていた。今回、 ^{92}Nb 初生存在度を高精度に決定することで、隕石の研究から太陽系形成以前の p 過程元素合成に対し強い制約を与えることに成功した。

●今後の展開

本研究では ^{92}Nb 初生存在度を高精度に決定することに成功した。今後は、 ^{92}Nb – ^{92}Zr 年代測定法を各種隕石や探査機による回収試料に適応し、初期太陽系の惑星物質の進化に対して精度の良いタイムスケールを提供することを試みる。また、理論計算による元素合成モデルの進展とともに、今後 p 過程元素合成に関する理解が進むことが期待される。

【用語説明】

- (1) **超新星爆発**：大質量の恒星がその最後に起こす大規模な爆発現象。宇宙における元素合成の中で、鉄より重い元素の生成に参与している。
- (2) **微惑星や原始惑星**：微惑星は原始太陽のまわりに存在したガス円盤中のダストが集まり km サイズに成長した小天体である。大部分の微惑星はさらに衝突・合体を繰り返し千 km サイズの原始惑星に成長する
- (3) **p 過程**：鉄より重い元素を生成する元素合成の一種。陽子過剰の核種を生成するプロセスであり、超新星爆発の際に起こると考えられている。
- (4) **小惑星ベスタ**：木星と火星軌道に散らばる小惑星帯に存在し、平均直径が 525 km である小惑星。小惑星帯では準惑星ケレス（平均直径 950 km）の次に大きく、地殻・マントル・金属コアの層構造を持つ地球型天体である。
- (5) **4 種類のメソシデライト隕石**：本研究に使用した隕石は、Vaca Muerta, NWA

1242, Estherville, Asuka (A) -882023 である。Vaca Muerta はチリ、NWA 1242 はアフリカ北部の砂漠地帯、Estherville はアメリカで採集された。A-882023 は、第 29 次南極地域観測隊により採集された隕石である。

- (6) **Ia 型超新星爆発**：白色矮星と伴星との連星系において、白色矮星の暴走的な核融合反応によって起こる超新星爆発。
- (7) **II 型超新星爆発**：太陽の 8 倍以上の質量を持つ大質量星において、鉄の中心核が重力崩壊を起こし、生じた衝撃波により星外層が吹き飛ばされることで起こる超新星爆発。

【論文情報】

掲載誌：*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*

論文タイトル：Precise initial abundance of Niobium-92 in the Solar System and implications for *p*-process nucleosynthesis（太陽系のニオブ 92 の高精度初生存在度と *p* 過程元素合成への制約）

著者：Makiko K. Haba, Yi-Jen Lai, Jörn-Frederik Wotzlaw, Akira Yamaguchi, Maria Lugaro, Maria Schönbachler

DOI：10.1073/pnas.2017750118

【問い合わせ先】

東京工業大学 理学院 地球惑星科学系 助教
羽場 麻希子

Email: haba.m.aa@m.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2616 FAX: 03-5734-3537

国立極地研究所 准教授
山口 亮

Email: yamaguch@nipr.ac.jp

TEL: 042-512-0707 FAX: 042-528-3479

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報課

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661

国立極地研究所 広報室

Email: kofositu@nipr.ac.jp

TEL: 042-512-0655 FAX: 042-528-3105