

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14535

研究課題名（和文）太陽系に寄与した超新星爆発のメカニズムと太陽系重元素の起源に関する研究

研究課題名（英文）Mechanism of supernovae contributed to solar system and the origin of heavy elements

研究代表者

深井 稜汰（Fukai, Ryota）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・特任助教

研究者番号：10848469

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：太陽系に存在するほとんど全ての元素は、太陽系が誕生する以前に別の恒星環境で合成されている。重元素がどのようにして太陽系に輸送されたかは不明である。本研究では、太陽系の重元素の起源を輸送過程を含めて明らかにする。

はじめに数値シミュレーションにより、太陽系の重元素を輸送した粒子の条件を制約した。乱流が弱い状況で超新星爆発によるプレソーラー粒子の流入が起きると、炭素質隕石の同位体組成バリエーションをよく説明できることが明らかになった。また、プレソーラー粒子の元素存在度測定に向けて、超伝導遷移型X線マイクロカロリメータを備えたSTEMの開発・またクリーンルームの環境評価法を立ち上げた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は惑星科学における小惑星物質組成の研究と、天文学における元素の進化の起源を、これまでに無かった視点で複合した学際的研究である。今後のサンプルリターン探査でも必要不可欠となる分析設備・分析装置の開発段階を担ったことも重要な意義である。

研究成果の概要（英文）：Almost all elements in the solar system were synthesized in the other stellar environment before the birth of the solar system. It is unknown how heavy elements were transported to the solar system. In this study, we clarify the origin of heavy elements in the solar system, including the transport process.

First, we used numerical simulations to constrain the conditions of the particles that transported the heavy elements in the solar system. It was revealed that the inflow of presolar particles due to a supernova explosion in a weak turbulence situation can well explain the variation in the isotopic composition of carbonaceous meteorites. In addition, we developed a STEM equipped with a superconducting transition edge type X-ray microcalorimeter to measure the elemental abundances of presolar grains, and launched a method for evaluating the clean room environment.

研究分野：宇宙地球化学

キーワード：超新星爆発 元素合成 隕石

1. 研究開始当初の背景

太陽系のあらゆる物質は、水素からウランに至る元素によって構成されている。太陽系に存在するほとんど全ての元素は、一部を除いて太陽系が誕生する以前の宇宙環境(ビッグバン・恒星内の核融合反応など)によって合成されている。太陽系・地球の物質中に存在する元素を使った化学的研究は、地球・惑星系・生命などの誕生・進化を解明する地球惑星科学上で必要不可欠である。太陽系物質の化学的研究において、太陽系の元素組成は最も基本的なデータとなる。つまり、太陽系を構成する元素の起源を明らかにすることは、地球惑星科学において非常に普遍的かつ最重要なテーマであると言える。

太陽系の重元素(主にルビジウムからウランまで)の大部分は、太陽系形成以前に中性子捕獲反応という核合成過程で作られたと言われている。中性子捕獲反応は遅い反応(sプロセス)と速い反応(rプロセス)の2つに大別され、それぞれ異なる天体で起きる。太陽系に存在するsプロセスで出来る核種(s核種)は、赤色巨星という天体によって合成されたことが天文学分野の理論物理学研究・分光観測研究からわかっている(Kappeler et

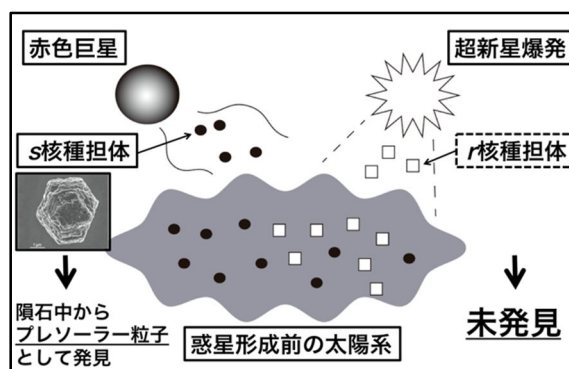


図1: 初期太陽系と重元素の起源

al. 2011)。更に、太陽系の小惑星を起源とするコンドライト隕石中には、赤色巨星で凝縮した微粒子(プレソーラー粒子)が含まれている。プレソーラー粒子1粒単位の同位体比測定などによって、赤色巨星由来の微粒子は太陽系にs核種を輸送した粒子(s核種担体)であることがわかっている(Zinner 2014)(図1)。更に、申請者らによる研究によって、赤色巨星由来の微粒子が惑星形成以前の太陽系において時空間的に不均質分布していたことも明らかになっている(Fukai and Yokoyama 2017, 2019)。

このように、太陽系重元素組成の起源のうちs核種の起源は理解されている一方で、r核種の起源の理解は進んでいない。白金・ウランといった地球化学上重要な元素は、rプロセスによってのみ合成されるため、r核種の起源の解明は非常に重要である。理論物理学研究によって、rプロセスが起きる天体は超新星爆発または中性子星合体であることがわかっている(Thielemann 2014)。しかし、sプロセスは基本的に化学平衡を保ちながら中性子捕獲が起きるのに対し、rプロセスは爆発的反応であるため、解析的なアプローチが困難である。そのため、理論物理学研究からのrプロセスに関する制約は限られており、太陽系のr核種の起源については統一的な見解が得られていない。分光観測分野においても、爆発的現象であることから観測が難しく、元素合成に関する直接的な証拠は得られていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、プレソーラー粒子の同位体比・元素存在度測定によって、太陽系におけるプレソーラー粒子の輸送条件を制約することである。

3. 研究の方法

- 円盤の物理化学プロセスをシミュレーションによって再現し、プレソーラー粒子の円盤動径方向分布を隕石の情報に基づき明らかにする。
- 電子顕微鏡と取り付けられた検出器を用いて、微小粒子の元素存在度を求める。
- 質量分析を用いて、微小粒子の元素存在度を求める。

4. 研究成果

• 数値シミュレーション

数値シミュレーションにより、太陽系の重元素を輸送した粒子の条件を制約した。特に Cr を輸送したプレソーラー粒子が超新星爆発により流入した状況について、円盤のパラメータ(乱流の程度など)を変えて詳しく調査した。結果として、乱流が弱い状況で超新星爆発によるプレソーラー粒子の流入が起きると、炭素質隕石の同位体組成バリエーションをよく説明できることが明らかになった (図 2 : Fukai and Arakawa 2021 ApJ)。

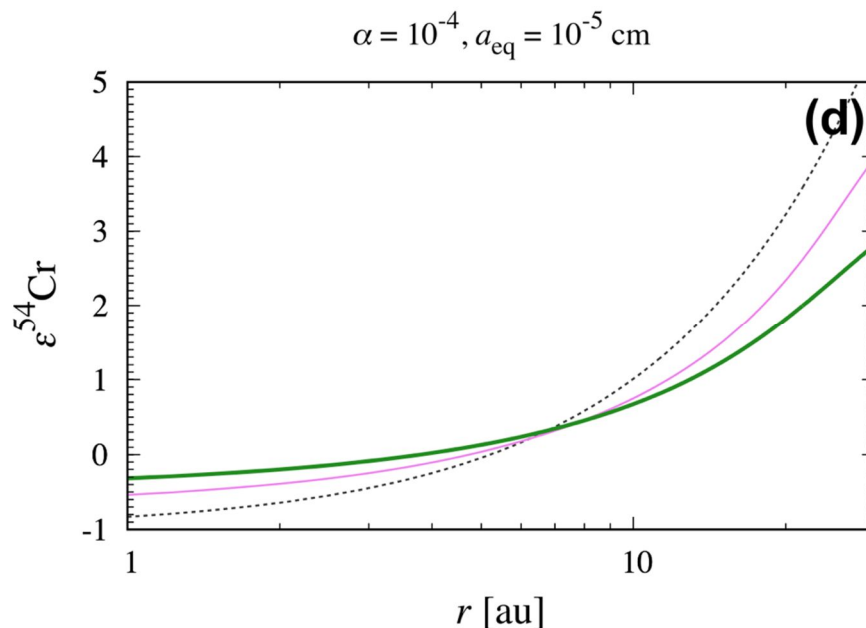


図 2 : Cr 同位体比の円盤上でのプロファイル

結果として太陽系に流入したプレソーラー粒子がどのように内側領域に輸送されるかは、地球にこうした粒子が届くプロセスを検討し、惑星形成を制約する上で重要である。我々の更なる数値シミュレーションによって、早期形成された木星が置かれた条件下でこのような流入が起きると、内側で形成する隕石の同位体組成バリエーションも整合的に説明できることが明らかになった (Homma, Okuzumi, Arakawa, Fukai in revision)。

• 顕微技術の開発

走査透過型電子顕微鏡(STEM)-エネルギー分散型 X 線分析(EDS)を用いることで、 μm スケールの微小領域について元素組成の測定が可能である。しかし、EDS 分析で使用される半導体検出器(SDD)の分光性能は 120 eV であり、低エネルギー帯域での複数の近接する特性 X 線の分離や、バックグラウンドとなる連続 X 線と特性 X 線の分離が困難である。分光性能を飛躍的に改善する X 線検出器として、超伝導遷移端型 X 線マイクロカロリメータ(TES カロリメータ)があり、分光性能は 2 eV 以下での運用が可能である。申請者は本装置に着目し、共同研究者とともに

にプレソーラー粒子の分析を実装することを試みた。最終年度において必要となる測定精度を達成するための開発が完了した。本研究は実試料の分析に向けて今後も継続する。

- 質量分析

研究開始当初は、ICP 質量分析計を用いたプレソーラー粒子の分析の実施を想定していた。しかし、本研究を進めることで、微量しか存在しないプレソーラー粒子の元素を測定するには、高い清浄度を達成可能なクリーンルーム環境に加え、定期的な汚染評価が必要であることが明らかになった。主に 2023 年度以降に、当該研究に必要な環境の汚染評価等の分析を行った(中野・深井ほか 2024 質量分析学会)。JAXA 相模原キャンパスのクリーンルームの浮遊物質からは、Al・Fe・Cr 等の元素が検出されることが明らかになった。

一方で、プレソーラー粒子の測定法としてこれまでよく用いられるのが SIMS を用いた質量分析法である。リュウグウ試料測定チームと協力し、リュウグウ試料における s プロセス・r プロセス担体のプレソーラー粒子の存在を明らかにした(Barosch et al. 2022 ApJL)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Barosch Jens, Nittler Larry R., Wang Jianhua... Ryota Fukai et al.	4. 巻 935
2. 論文標題 Presolar Stardust in Asteroid Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/ac83bd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 荒川 創太, 深井 稜汰, 本間 和明	4. 巻 31
2. 論文標題 原始太陽系星雲における同位体不均質性から読み解く微惑星・惑星形成史	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 遊星人	6. 最初と最後の頁 50-67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14909/yuseijin.31.1_50	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Fukai Ryota, Arakawa Sota	4. 巻 908
2. 論文標題 Assessment of Cr Isotopic Heterogeneities of Volatile-rich Asteroids Based on Multiple Planet Formation Models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 64 ~ 64
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/abd2b9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 3件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Ryota Fukai, Sota Arakawa, Kazuaki Homma, Tetsuya Yokoyama, Satoshi Okuzumi, and Yuri Shimaki
2. 発表標題 The isotopic variations in bulk-scale carbonaceous chondrites and non-carbonaceous meteorites
3. 学会等名 JpGU（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深井 稜汰, 白井 寛裕
2. 発表標題 OSIRIS-REx・MMXに向けたキュレーションプロトコルの検討
3. 学会等名 惑星圏研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryota Fukai, Sota Arakawa
2. 発表標題 Initial distribution of the volatile-rich asteroids inferred from the isotopic records: Implication for return samples from Ryugu
3. 学会等名 Goldschmidt (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 深井 稜汰, 荒川 創太, 本間 和明
2. 発表標題 隕石全岩の同位体組成・元素存在度による小惑星形成過程への制約
3. 学会等名 日本惑星科学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 深井 稜汰
2. 発表標題 小惑星ができた場所と、地球の材料
3. 学会等名 太陽系天体若手研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 深井 稜汰, 荒川 創太, 本間 和明
2. 発表標題 初期太陽系の同位体不均質性から読み解く微惑星・惑星形成
3. 学会等名 惑星圏研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryota Fukai, Hisashi Asanuma, Tsuyoshi Komiya, Tetsuya Yokoyama, Takafumi Hirata
2. 発表標題 Assessments of the effects by mass-dependent fractionation for ^{142}Nd compositions in Archean rocks
3. 学会等名 Goldschmidt virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tetsuya Yokoyama, Ryota Fukai, Yuichiro Nagai, Takafumi Hirata
2. 発表標題 Origin and evolution of distinct isotopic variabilities for Sr, Mo, and Nd within CC and NC reservoirs
3. 学会等名 Goldschmidt virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Fukai, Sota Arakawa
2. 発表標題 The evolutional model of chromium isotopic heterogeneities in the protoplanetary disk
3. 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaori Hirata, Tomohiro Usui, ... inc. Ryota Fukai
2. 発表標題 Constraints of the origin of Phobos using major elements data obtained by MMX MEGANE
3. 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toru Yada, Masanao Abe, ... inc. Ryota Fukai
2. 発表標題 Recovery of C-type asteroid Ryugu samples returned by HAYABUSA2
3. 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Fukai, Sota Arakawa
2. 発表標題 Formation region of volatile-rich asteroids inferred from nucleosynthetic isotope variations in carbonaceous chondrites
3. 学会等名 JpGU-AGU virtual
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tetsuya Yokoyama, Ryota Fukai, Yuichiro Nagai, Takafumi Hirata
2. 発表標題 Origin and evolution of distinct isotopic variabilities for Sr, Mo, and Nd within inner and outer solar system
3. 学会等名 JpGU-AGU virtual
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒川創太, 深井稜汰
2. 発表標題 原始太陽系星雲の核合成起源同位体不均質: ダスト粒子の移流・拡散・落下の影響について
3. 学会等名 新学術領域 星惑星形成 2020年度大研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 深井稜汰, 浅沼尚, 小宮剛, 横山哲也, 平田岳史, 若木重行
2. 発表標題 太古代岩石の ¹⁴² Nd異常に対する質量依存Nd同位体分別による影響
3. 学会等名 日本地球化学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 深井稜汰, 横山哲也, 若木重行
2. 発表標題 平衡論的同位体効果が放射性起源Nd同位体比測定に与える影響
3. 学会等名 日本質量分析学会同位体比部会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Ryota Fukai Homepage http://ryotafukai.web.fc2.com/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------