

(別紙様式-2)

太陽系年代学の進展と放射線環境変動研究との融合
Advances in Solar System Chronology and Integration with Studies of the Radiation
Environmental Changes

(代表者) 渡邊 誠一郎、東海国立大学機構名古屋大学・大学院環境学研究所

【研究メンバー】 渡邊の他、城野 信一、日高 洋、橋口 未奈子、齊藤 天晴 (以上、環境学研究所)
三好 由純、加藤 丈典、岩井 一正 (左記3名、宇宙地球環境研究所)

【研究目的】 太陽系年代学と太陽系放射線環境の変動研究を融合させ、太陽系進化を理解することを大目的とする。「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星試料の分析から、太陽系年代学には、いくつか検討すべき課題があることがわかった。太陽系の初期同位体比の空間分布、母天体の水質変成年代の相互矛盾、事後の年代擾乱の可能性、銀河宇宙線生成核種の深度依存性などである。これらの課題は同位体計測の高精度化によって顕在化してきた側面があり、太陽系進化の各種年代をより精密に決定していくためにはその解明が求められる。よって、これらの問題を解決するための新たな年代測定法、年代較正法、年代をリセットする過程などを検討する。さらに、宇宙線生成核種を使った宇宙線照射年代の正確な理解についても検討することで、太陽系における放射線環境の変動などを知る方法論を議論する。

【研究方法】 2024年度は4回 (4月21日、8月28日、12月6日、2月28日) 研究会を開催し、3人の講師を招聘した。第1回「宇宙線生成核種：月からRyugu」西泉 邦彦 (UC Berkeley)、第2回「若い太陽型星の恒星風やCMEから知る太陽圏進化」行方 宏介 (京都大学)、第3回「LA-ICP-MSを用いた同位体比分析」仁木 創太 (名古屋大学ISEE)。それぞれの講演の後に、議論を行った。さらに研究メンバーのみによる第4回研究会を含めて、既存の太陽系の年代測定法を整理・比較し、その問題点や誤差を再検討するとともに、新たな年代測定法の適用の可能性や宇宙試料での放射線環境変動の検出、さらには45億年にわたる太陽圏の進化などをテーマに幅広く議論を行った。また、日本惑星科学会秋季講演会などの場で、関係する研究者と討議を重ねた[4-9]。

【研究結果】 すでに進めていたリュウグウ試料の鉱物構成を説明する水質変成条件を明らかにする化学平衡計算に、本課題の年代学的成果を加味して、研究をまとめ出版した[1]。また、本課題の議論を踏まえた「はやぶさ2」帰還試料の制約条件を満たす太陽系形成論に関する講演・学会発表を行った[4, 6]。さらにアモルファス氷粒子の焼結による成長を調べ[2, 7, 8]、それを二段階の微惑星形成モデルにつなげる研究も進めている。また、太陽系での同位体比分布に見られる三分性 (太陽系物質は、同位対比から、NC, CC, CIと呼ばれる3つのカテゴリーに分けられる) を、ダストから惑星への成長過程から明らかにする研究は、本課題での議論も一つの土台として、渡邊が代表者の科研費基盤研究(B)として2024年度から進めている。今年度の成果としては、サブミクロンサイズのダスト (固体微粒子) から巨大惑星コア (地球質量の10倍程度) までをシームレスに計算できるコードに各領域・時刻の天体が材料物質として初期にどこにあったダストを集めたかを追跡できる機能を付加した。これにより、日心距離と天体質量の二次元図上に天体の材料物質質量平均された初期位置を面密度とともに表示する動画を作成した (Kobayashi & Watanabe 2025, 投稿準備中。図1に動画のスナップショットを示す)。この動画からは、連続的な面密度分布を持つ原始惑星系円盤で、初期ダストが動径方向に同位体比勾配を持っていたなら、集積天体の同位体比は、動径位置よりも、天体質量に強く依存することが明らかになり、太陽系年代学との比較を進めている。他にも、太陽風の三次元構造・時間変動を加味した太陽圏モデルでの銀河宇宙線量を推定手法の検討や、宇宙線照射に伴う中性子捕獲反応による月面試料のYb同位体変動検出のための増幅回路による同位対比測定高感度化、地球外有機物の年代測定法の各種検討、惑星物質の中性子エネルギースペクトルの化学組成依存性の検討などが、今年度、研究メンバーによって行われた。

【今後の展望】 本課題は今年度が2年目のため終了するが、本課題を通じて集約された1つのテーマとして「隕石観察による過去～現在の宇宙環境および太陽活動の変動の理解と暗黒物質の探索」を、橋口を代表者として、2025年度の融合研究戦略課題ストラテジー型として申請を行った。これはパラサイト隕石 (石鉄隕石の一種) 中のかんらん石中に銀河宇宙線 (GCR) トラックを探し、GCRフラックスの変動や太陽活動の変動について制約を与えるという野心的な計画である。トラック検出手法の確立やバックグラウンドの評価など課題は多いが、ぜひとも成果につなげたい。

【成果論文リスト】

- [1] T. Shibuya, Y. Sekine, S. Kikuchi, H. Kurokawa, K. Fukushi, T. Nakamura, S. Watanabe (2024), "Aqueous alteration in icy planetesimals: The effect of outward transport of gaseous hydrogen", *Geochimica et Cosmochimica Acta* **374**, 264–283.
- [2] S. Sirono (2025), "Growth of amorphous ice grains by sintering in a protoplanetary disk", *Icarus* **427**, 116370.
- [3] T. Yuguchi, T. Kato, Y. Ogita, M. Watanabe, H. Yamazaki, A. Kato, D. Itoh, T. Yokoyama, S. Sakata, T. Ohno, "Crystallization processes of quartz in a granitic magma: Implications for the magma chamber processes of Okueyama granite, Kyushu, Japan", *Journal of Asian Earth Sciences*, **265**, 106091.

【学会・ワークショップ・講演会等発表リスト】

- [4] 渡邊 誠一郎, 「はやぶさ2が明らかにした太陽系形成過程」, CPSセミナー, 神戸大学惑星科学研究センター (神戸市), 2024/07/24.
- [5] 加藤 丈典, 「電子プローブマイクロアナライザー (E PMA) による極微量元素定量分析の測定条件決定: 電流と計数時間」, 一般社団法人日本鉱物科学会2024年年会, 名古屋大学東山キャンパス (名古屋市), 2024/09/12.
- [6] 渡邊 誠一郎, 「はやぶさ2探査と帰還試料分析から得られた制約条件を満たす太陽系形成論」, 日本惑星科学会秋季講演会, 九州大学医学部百年講堂 (福岡市), 2024/09/25.
- [7] 城野 信一, 「アモルファス氷粒子の焼結による成長」, 日本惑星科学会秋季講演会, 九州大学医学部百年講堂 (福岡市), 2024/09/26.
- [8] S. Sirono, "Thermal evolution of icy dust aggregates through the growth of ice particles", Pebbles in planet formation, 国立天文台 (三鷹市), 2025/02/10.
- [9] 加藤 丈典, 「質量吸収係数の闇」, 変成岩などシンポジウム2025, 東北大学青葉山キャンパス (仙台市), 2025/3/12-14.

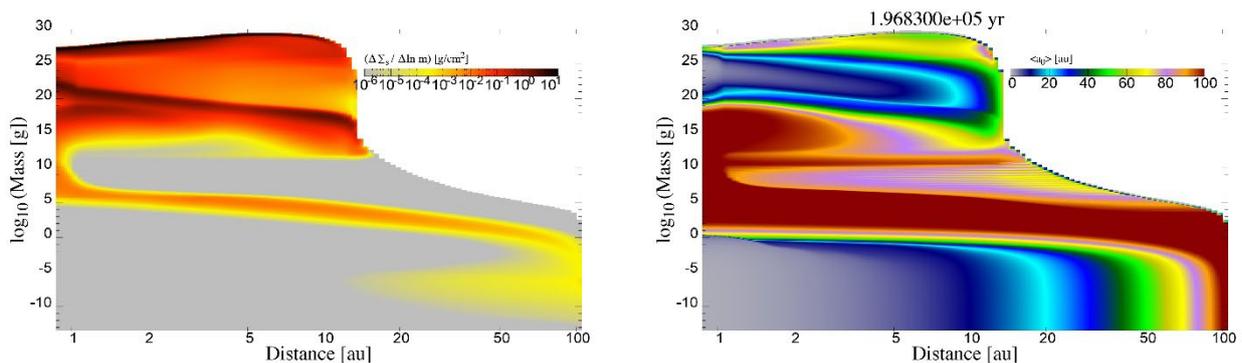


図1: 太陽系同位体比分布を探る惑星成長過程シミュレーション例 (Kobayashi & Watanabe, 2025, in preparation) 固体天体 (ダスト・惑星) の太陽からの距離 r (横軸) と天体質量 m (縦軸) に対する質量毎の固体面密度 $\Delta\Sigma_s / \Delta\ln m$ (左図) と質量平均された材料物質の初期位置 $\langle a_0 \rangle$ (右図) を示す。簡単のため、この例では、原始惑星系円盤ガス面密度は r^{-1} に比例、初期ガス・固体 (氷+岩石) 比は氷蒸発は無視して一定としている。ダスト成長開始から19.7万年後のスナップショット。左図で水平からやや左上がりに伸びた高面密度帯は、下 (低質量側) から (太陽方向へ落下する) ペブル (ダスト集合体), 微惑星, 原始惑星 (巨大惑星固体コア) に相当する。